

Реологічні процеси в схилових масивах м. Київ

Максим Рева¹

к. геол. н., доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології ННІ «Інститут геології»,

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

e-mail: reva_max@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-1141-093X>;

Олександр Лисенко²

директор² ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань», Київ, Україна,

e-mail: office@iv.kiev.ua,  <https://orcid.org/0009-0003-8048-3371>;

Дмитро Чомко¹

к. геол. н., доцент, зав. кафедри гідрогеології та інженерної геології,

e-mail: chomko@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-8454-5531>

В роботі розглядаються зсувні процеси, які виникли на правобережжі м. Київ. Для розуміння масштабів проблеми наведена загальна статистика розвитку зсувів в місті. В статті розглянуто використання ГІС технологій, як сучасного та досить ефективного методу моніторингу зсувних процесів. Автори акцентують увагу на двох зсувах, які відбулися та відрізняються від решти нетиповою механікою процесу, на яку вплинуло перезволоження ґрунтової маси. Саме ця відмінність стала причиною проведення даного наукового дослідження. Поведінка перезволоженої маси має особливу механіку руху по схилу і класифікується як – зсуви спливання. В статті досліджується даний рух перезволоженої маси ґрунту на схилі як реологічний процес. Авторами проаналізовано теоретичні основи поведінки ґрунтової маси в таких умовах та розглянуто її як реологічну модель. Наведено методику розв'язання таких завдань. Авторами досліджено необхідні параметри ґрунту, які використовуються в побудові розрахункової моделі. Серед параметрів було виділено коефіцієнт в'язкості ґрунту, який заслуговує особливої уваги при розгляді реологічних процесів в ґрунті. Розглянуто модель розв'язку реологічного процесу не можливо вирішити без коефіцієнту в'язкості ґрунту. Використовуючи науковий доробок українських вчених, авторами було визначено цей коефіцієнт в лабораторії. В статті досліджена можливість виникнення зсуву спливання на одному із культурних об'єктів з метою збереження останнього. Автори своє дослідження побудували на основі інженерних вишукувань, які проводились за метою реконструкції сходів в парку Вічної Слави у м. Київ. В статті проаналізована можливість виникнення реологічних процесів на схилах та їх роль у безпеці та життєдіяльності м. Києва. На основі розв'язку моделі встановлено глибину захоплення та швидкість руху потенційного зсуву спливання у разі перезволоження ґрунту на схилі в парку Вічної Слави у м. Київ.

Ключові слова: реологічні процеси, зсуви, зсуви спливання, коефіцієнт в'язкості ґрунту, стійкість схилу, перезволоження ґрунту, інженерно-геологічний елемент.

Як цитувати: Рева Максим. Реологічні процеси в схилових масивах м. Київ / Максим Рева, Олександр Лисенко, Дмитро Чомко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 97-107. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-07>

In cites: Reva Maksym, Lysenko Oleksandr, Chomko Dmytro (2024). Rheological processes in the slope massifs of the city of Kyiv. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 97-107. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-07> [in Ukrainian]

За даними Спеціалізованого управління протизсувних підземних робіт «СУПІР» в м. Київ налічується близько 42 зсувів, які перебувають в активній фазі [16], відповідно зсувонебезпечних ділянок значно більше. Зсувні процеси в Києві обумовлені геоморфологічними, інженерно-геологічними умовами та антропогенним чинником. А саме досить розчленований рельєфом, ярами та балками правого високого берегу р. Дніпро, який в геологічному розрізі складений – лесами, суглинками та супісками. Особливої уваги слід приділяти розбудові Києва, а саме масове багатопверхове будівництво, прокладка доріг, засипання ярів, створення ландшафтних насаджень на схилах Київських пагорбів тощо. Внаслідок цього відбулися порушення гідрологічного режиму поверхневих і підземних вод, виникнення баражного ефекту та зволоження ґрунтів. Усе це сприяло активізації гравітаційних, і насамперед, зсувних процесів та руй-

нуванню будівельних об'єктів та інфраструктури міста. Сучасне будівництво, незважаючи на новітні технології протизсувного захисту, продовжує сприяти активізації старих і появи нових зсувних ділянок. Наряду з тим, зсувні процеси є наслідком багатьох факторів, але значне збільшення випадків зсувів відбувається в роки з максимальною кількістю опадів [3], які інфільтрують і насичують лесові ґрунти [14]. Таким чином, в останні роки переважають штормові опади [3], що призводить до активації ерозійних змивів, вторинного затоплення та зсувів. Антропогенний вплив в активізацію зсувних процесів має вагомe значення. Внаслідок втручання в геологічне середовище порушується гідрологічний режим, підвищуються рівні ґрунтових вод, змінюється кут нахилу поверхні, порушується геологічна суцільність порід, руйнується деревостан і дерновий покрив. Всі ці умови на сучасному етапі можна ефективно контролювати за допомогою

геоінформаційних систем (ГІС). Ці системи допомагають враховувати розвиток техногенного навантаження та зміни навколишнього середовища, виявлення та картографування районів активізації та новоутворення зсувів, часто в місцях, недоступних для наземних досліджень. Так,

дослідники Філіпович, Ліщенко та Пазинич в своїх роботах демонструються схематичні карти розвитку зсувних процесів на правому березі Києві, часто прояв реальних зсувних процесів співпадає з побудованими в ГІС схемами (рисунок 1) [3].



Рис. 1. Картографічна модель розповсюдження та динаміки зсувів з отриманими шарами ГІС (фрагмент) [3]. Зсувні ділянки: 1 – контури зсуву скориговані, за космічними даними; 2 – активні зсувні ділянки; 3 – зони підвищеної зсувної небезпечності; зони підвищеного зсувного ризику: 4 – небезпечна; 5 – помірно небезпечний; 6 – малонебезпечний; 7 – зони геодинамічного напруження (лінеаментів), виявлені за результатами інтерпретації матеріалів космічного зображення та частково підтверджені геологічними даними; горизонтальна структура рельєфу: 8 – верхня кромка схилу; 9 – нижня кромка скату; 10 – вигин схилу /

Fig. 1. Cartographic model of landslide distribution in Kyiv. Landslide areas: 1 – landslide contours; 2 – active landslide areas; 3 – zones of increased landslide hazard; 4 – dangerous; 5 – moderately dangerous; 6 – low-hazard; 7 – zones of geodynamic stress; 8 – upper edge of the slope; 9 – lower edge; 10 – slope bend.

Більшість зсувонебезпечних ділянок в Києві за довгу історію боротьби є локалізованими, тобто такими до яких були вжиті протизсувні і протиаварійні заходи: побудовані підпирні стінки, закладені дренажні мережі та інше. Але інколи, навіть на контрольованих ділянках, виникають зсуви. Яскравим прикладом цього можна вважати зсув великої альпійської гірки в ботанічному саду імені О. Фоміна, який почав розвиватися влітку 2007 року [13] рисунок 2.

Під час досліджень даного зсуву було розглянуто багато версій щодо причин його розвитку.

Але науковці та дослідники прийшли до висновку, що головною причиною було перезволоження ґрунтів з яких складається схил, це відбулося через полив рослин, що ростуть на альпійській гірці та через доволі велику кількість атмосферних опадів. Порівнюючи даний зсув із більшістю, які відбуваються в м. Києві можна зробити висновок, що він відрізняється від інших саме за механікою процесу. В інженерній геології, Маслов такі зсуви називав – «зсуви течіння». Відповідно до класифікації Золотарьова такі зсуви називаються зсуви спливи [12]. Ці зсуви можна



Рис. 2. Зсув альпійської гірки в ботанічному саду імені О. Фоміна /
Fig. 2. Landslide of an alpine slide in the O. Fomin Botanical Garden

розглядати як **реологічний процес** [2, 8, 4, 6, 11, 20, 22].

Реологічні процеси виникають при значному зволоженні сповзаючих мас ґрунту та особливо чітко це проявляється при їх перезволоженні $W \rightarrow W_L$ (вологість природня наближається до вологості на межі текучості). Характерною особливістю даного виду зсувного процесу є те, що в русі зсуву бере участь вся маса перезволоженої сповзаючої породи, проте швидкість її руху залежить від глибини. При цьому зсувна маса може з'їхати із схилу незалежно від виділеної лінії ковзання та навіть за умови забезпеченої загальної стійкості тіла зсуву. Рух ґрунту відбувається досить повільно, що дозволяє його розглядати як деформації повзучості, що в свою чергу є складовою реологічних процесів [1, 2, 5, 7].

Мета роботи: дослідити можливість розвитку реологічних процесів на схилах для збереження природних та штучних ландшафтів.

Завдання роботи: проаналізувати теорію виникнення такого процесу на прикладі схилу в парку Вічної Слави, а також дослідити та виконати розрахункову модель щодо визначення величини захвату зсувного тіла та його швидкості сповзання.

Дана стаття має на меті звернути увагу на реологічні процеси, які розвиваються на схилах та ключові елементи в розрахункових моделях цих процесів. Вивченням і дослідженням реологічних процесів науковці займалися досить давно, але на сучасному етапі практичного використання теоретичних досліджень на ці процеси майже не звертають уваги, хоча вони мають міс-

це бути. Так, у березні 2024 року, на досліджуваній ділянці, але нижче за схилом відбулась активна зсув (рисунок 3). Причиною виникнення даного зсуву стало перезволоження маси делювіальних відкладів, що перекривають корінні породи через підйом рівня ґрунтових вод, весняні опади та сезонне танення снігу. Основною складністю для дослідників та комунальних служб при проведенні робіт із зупинки даного процесу стала досить висока швидкість його руху до 1,5 м/добу. За механізмом дії даний зсув був схожий на вплив перезволоженої маси. Тож, аналіз моделі з визначення швидкості розвитку зсуву дозволить розраховувати потенційно небезпечні зсувонебезпечні ділянки [9, 11, 7]. Це матиме важливе практичне застосування, оскільки комунальні служби зможуть оперативно розраховувати час на локалізацію таких процесів, що є важливим в умовах життєдіяльності сучасного міста.

Методика. Розв'язок задач з реологічних процесів на схилах базується на класичних моделях Бінгама-Шведова, Ньютона та Максвелла [10]. Безпосередньо розв'язок задач пов'язаних з зсувами течіння полягає у вирішенні моделі Бінгама-Шведова, яка була адаптована під інженерно-геологічні задачі Масловим [7].

Дана модель вирішується розв'язкою диференційного рівняння з визначення швидкості руху зсувної маси.

$$dv = \frac{\tau_y - \tau_{lim}}{\eta} dy \quad (1)$$

$$dv = \frac{\tau_y - (p_y t g \varphi_{sat} + c_c)}{\eta} dy \quad (2)$$

де, η – коефіцієнт в'язкості ґрунту ($z/(cm^*c)$);



Рис. 3. Зсув на схилі біля Парку Вічної Слави та Аскольдової Могили /
 Fig. 3. Landslide on a slope near the Park of Vichnoyi Slavy and Askold's Mohyla

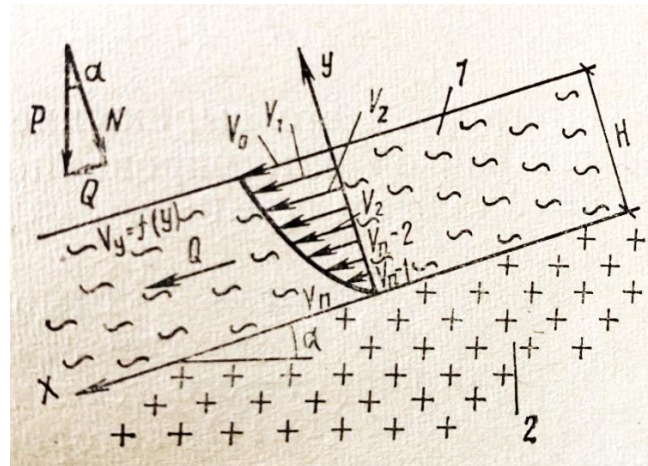


Рис. 4. Розрахункова схема визначення швидкості переміщення зсувної маси
 (1 – ґрунти в які піддаються сповзанню; 2 – корінні породи) /

Fig. 4. Calculation scheme for determining the velocity of the sliding mass (1 – soils susceptible to sliding; 2 – bedrock)

τ_y – дотична напруга; $\tau_{lim} = p_y \cdot tg \phi_{sat} + c_c$ – межа повзучості.

В основі розв’язку даної схеми лежить те що, в наслідок перезволоження ґрунтової маси вагою P , яка залягає на схилі під кутом α відбувається розподіл сил $P = N + Q$ (N – нормальна $P \cdot \cos \alpha$; та Q – дотична $P \cdot \sin \alpha$). Вага ґрунту

залежить від питомої ваги (γ) та його потужності H ($H-y$), відповідно $P = \gamma \cdot (H-y)$ (рис. 4). Створений тиск вагою ґрунту призводить до виникнення напруг σ . Напруга в свою чергу складається $\sigma = \sigma_y + \tau_y$, де $\sigma_y = P \cdot \cos \alpha$ та $\tau_y = P \cdot \sin \alpha$.

Розвиток зсуву спливання відбувається коли дотична напруга буде більшою за межу повзучо-

сті ($\tau_y > \tau_{lim}$). При чому, межа повзучості залежить від тиску P та кута внутрішнього тертя ϕ і питомого зчеплення C . Основною причиною виникнення зсувів спливання при перезволоженні ґрунтової маси є зміна цих характеристик ґрунту, відповідно тиск P збільшується через збільшення питомої ваги γ , кут внутрішнього тертя ϕ знижується ($\phi \rightarrow \phi_{sat}$), питоме зчеплення C знижується і обмежується структурним зчепленням ($c \rightarrow c_c$).

Однією з характеристик зсувів спливання є те, що вони розвиваються на певну зону (глибину захвату D). Потужність цієї зони визначається умовою, що на глибині D дотичні напруження τ , за умови $D=H$ -у будуть дорівнювати межі повзучості $\tau_{lim} = \rho_y t g \phi_{sat} + c_c$. Відповідно глибину захвату можна визначити за наступною залежністю :

$$D = \frac{1}{\gamma_{sat} \sin \alpha - \cos \alpha \cdot t g \phi_{sat}} c_c \quad (3)$$

Щоб визначити швидкість руху сповзаючої маси потрібно проінтегрувати рівняння 2. Відповідно формула швидкості зсуву спливання v_0 за умови $y=H$ (рис.3) та $c_c \neq 0$ набуває виду:

$$v_0 = \frac{\gamma_{sat}}{\eta} \left[H(H - D) - \frac{(H-D)^2}{2} \right] (\sin \alpha - \cos \alpha t g \phi_{sat}) - \frac{c_c}{\eta} (H - D) \quad (4)$$

На основі вищенаведеного можна зробити висновок, що кількісна характеристика зсуву спливання може бути представлена у визначенні потужності ґрунтової маси, що сповзає та у швидкості її руху.

Виклад основної інформації. Ділянка дослідження знаходиться в парку Вічної Слави на схилі, м. Київ.



Рис. 5. Ділянка дослідження / Fig. 5. Research area

Ділянка дослідження спочатку вивчалася згідно з технічним завданням та договором з

ТОВ «УКРГЛОБАЛБУД» з метою проведення інженерно-геологічних вишукувань під капіта-

льний ремонт сходів парку "Вічна Слава" у Печерському районі м. Києва. Завданням дослідження було, з'ясування геологічної будови, гідрогеологічних умов і фізико-механічних властивостей ґрунтів, які залягають на глибині до 16,0 м, та розрахунок стійкості схилу. Згідно з завданням замовника, виконано – буріння 3-х свердловин глибиною 10,0-16,0 м – 37,0 п.м.; відбір зразків порушеної будови – 16 зразків, проаналізовано матеріали попередніх досліджень ділянки.

На ділянці вишукувань були проведені інженерно-геологічні вишукування ТОВ «Центр Інженерні Вишукування» відповідно до нормативів [15,16]. На основі вишукувань визначені: інженерно-геологічні умови ділянки дослідження, побудовані розрізи та отримані фізико-механічні властивості ґрунтів.

Інженерно-геологічні умови ділянки вишукувань відноситься до III (складної) категорії, згідно з ДБН А.2.1-1:2008.

В геоморфологічному відношенні місце робіт знаходиться на правому березі р. Дніпро, в межах схилу Київського плато до долини ріки, ускладненого Панкратовим яром та техногенними формами рельєфу (підсіпка, підрізка ґрунтів схилу). Абсолютні відмітки поверхні коливаються в межах 191,15-167,59 м.

Геологічний розріз до розвіданої глибини 46,0 м (з урахуванням даних вишукувань попередніх років) складений:

- ґрунтово-рослинним шаром з корінням (ПЕ-1), подекуди - із щебенем, будівельним сміттям, потужністю 0,2-0,5 м;

- насипними ґрунтами - супісками пілуватими, твердими, з включеннями будівельного сміття (щебінь, уламки цегли, деревина) 10-20 %, подекуди - 30-40 %, злежалими (ПЕ-2д), потужністю 2,0-9,6 м;

- верхньоплейстоценовими-голоценовими делювіально-пролювіальними відкладами, представленими супісками пілуватими, твердими (ПЕ-23а), суглинками легкими пілуватими, твердими (ПЕ-24а) та пісками мілкими (ПЕ-27б), середньої щільності, малого ступеню водонасичення, загальною потужністю 1,2-12,8 м;

- верхньоплейстоценовими-голоценовими елювіальними, еолово-делювіальними супісками пілуватими, твердими, лесовидними, просідними (ПЕ-29а), потужністю 5,1 м та супісками пілуватими, пластичними, лесовидними (ПЕ-29б), потужністю 1,7 м;

- середньоплейстоценовими водно-льодовиковими, озерно-льодовиковими відкладами, представленими супісками піщанистими, пластичними (ПЕ-35б), суглинками легкими пілуватими з прошарками піщанистих, з включеннями

гравію та гальки до 15 %, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-36а), тугопластичними з прошарками м'якопластичних (ПЕ-36б), глинами легкими пілуватими, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-37а), пісками пілуватими, середньої щільності з прошарками щільних, насиченими водою (ПЕ-38б) та пісками середньої крупності, середньої щільності, насиченими водою (ПЕ-40б), загальною потужністю 12,0-15,1 м;

- неогеновими "бурими" глинами легкими пілуватими, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-47а), потужністю 1,1-1,9 м;

- неогеновими "строкатими" глинами легкими пілуватими, важкими, твердими та напівтвердими (ПЕ-48а), потужністю 10,1-16,5 м;

- неогеновими відкладами новопетрівської світи, представленими суглинками легкими піщанистими, твердими (ПЕ-49а), пісками мілкими, щільними, малого ступеню водонасичення (ПЕ-50в), загальною розкритою потужністю 1,3-16,1 м;

- палеогеновими відкладами межигірської світи, представленими пісками мілкими, щільними, малого ступеню водонасичення (ПЕ-57в), розкритою потужністю 1,4 м.

За даними вишукувань попередніх років, просідання лесової товщі (ПЕ-29а) при повному водонасиченні становить менше 5 см, початковий тиск просідання коливається в межах 22-349 кПа.

Ґрунтові води на період вишукувань (травень 2023 року) зустрінуті свердловиною №2 на глибині 9,5 м (абсолютна відмітка 168,39 м), свердловинами №№ 3а*, 18а*, пробуреними у 2017 році [21], на глибинах 6,3-13,2 м (абсолютні відмітки 172,55-176,95 м).

Водовміщуючими ґрунтами є водно-льодовикові та озерно-льодовикові відклади. Водотривом є товща «бурих» та «строкатих» глин. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів. Присутня також техногенна складова живлення.

Обмежене поширення ґрунтових вод на схилі обумовлено впливом дренажних штольневих систем.

Слід звернути увагу на наявність розущільнених зон в насипних ґрунтах в свердловині № 1, що свідчить про можливі процеси суфозійного виносу.

На ділянці вишукувань було визначено ймовірний розвиток зсувних процесів, він може проходити в межах схилу Панкратового Яру.

Також відповідно до технічного завдання було визначено коефіцієнт стійкості схилу K_{st} . Коефіцієнт стійкості схилу визначався за допо-

могою програмного комплексу Slide V.6.0 та спеціальної програми інституту Київпроект – для визначення зсувного тиску. Розрахунки проведені для двох можливих випадків: для природного і водонасиченого стану ґрунтів [21].

Результатом розрахунків було отримання площини ковзання з найменшим кількісним по-

казником стійкості – коефіцієнта стійкості, який визначається як співвідношення утримуючих і зсувних сил на схилі. Нормативний коефіцієнт стійкості 1.25. Отримані результати: для природного стану ґрунтів коефіцієнт стійкості $K_{st} = 1,558$; для водонасиченого стану ґрунтів $K_{st} = 1,072$ [21].

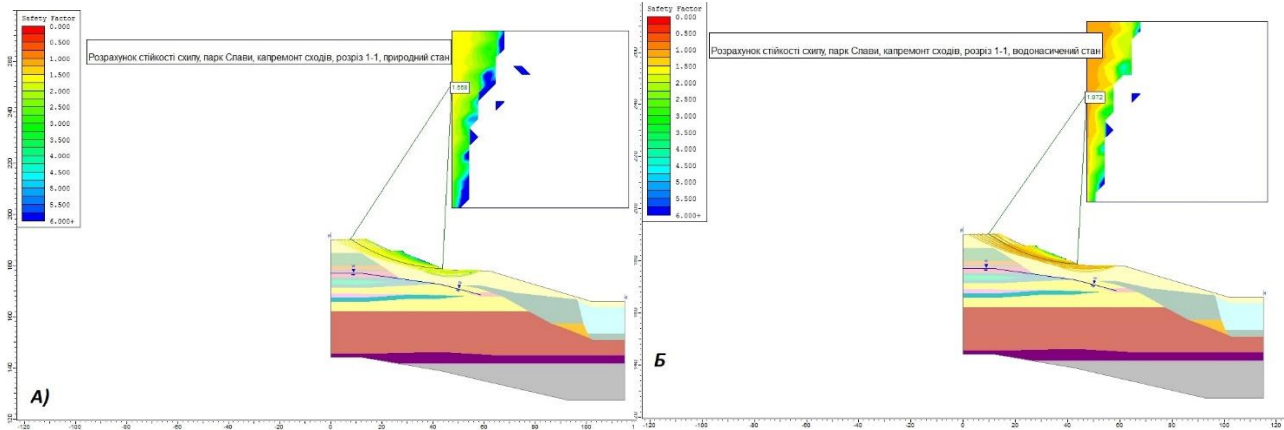


Рис. 6. Розрахункова схема для визначення коефіцієнту стійкості схилу (А – природний стан, Б – водонасичений) /

Fig. 6. Calculation scheme for determining the slope stability coefficient (A–natural state, B–water saturated)

Результати розрахунку показують, що за природних умов даний схил перебуває у стійкому стані, але за умови його повного замочування він теоретично може піддатись зсуву. Проте, такий сценарій є малоімовірним тому, що верхня частина схилу складена дренованими ґрунтами, які будуть досить гарно відводити воду, що не дозволить його повністю затопити.

При вивченні схилу були виявлені деформації сходів, які свідчать про можливе системне

водонасичення ґрунтів насипу, на якому прокладені сходи (див. рис. 5). На схилі водонасичення ґрунтів відбувається через системний полив рослин з метою збереження ландшафтного дизайну, та через атмосферні опади. Це дало підставу розглянути дані деформації, як можливий зсув спливання. Оскільки схил перебуває в стійкому стані, тіло зсуву не рухається, а в його верхній частині відбуваються незначні деформації в наслідок перезволоження.

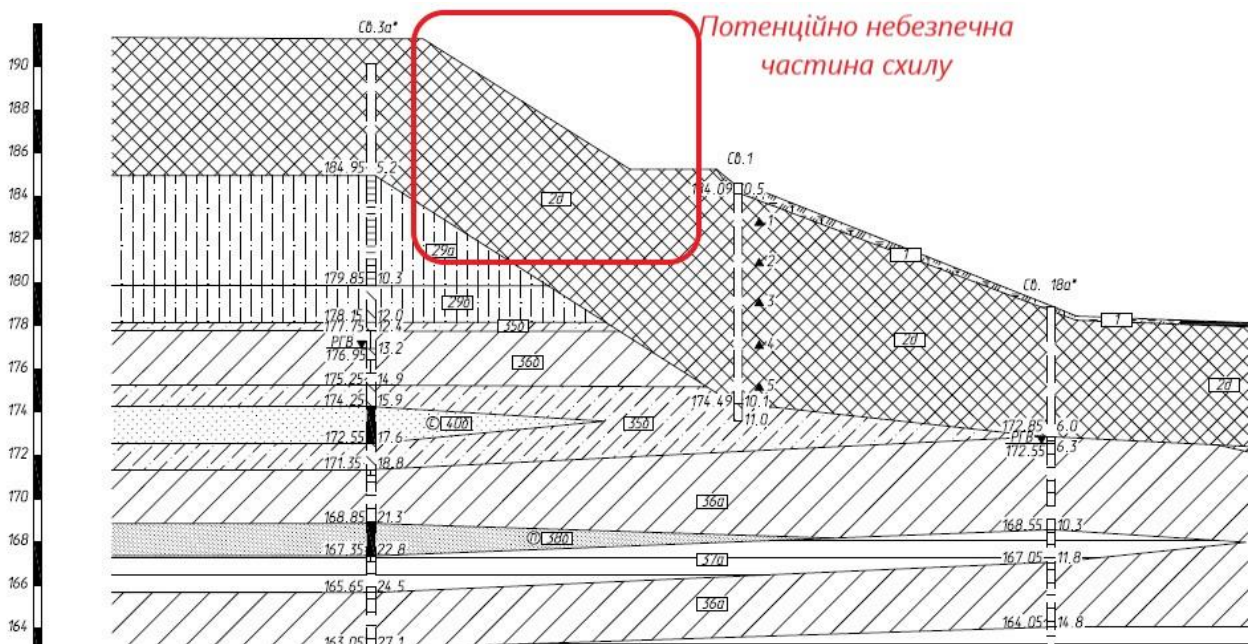


Рис. 7. Схематичний розріз схилу в парку Вічної Слави / Fig. 7. Schematic section of the slope in the Park of Vichnoyi Slavy

На основі розрізу було обрано потенційну ділянку де можуть розвинутися зсуви спливання (реологічні процеси), це частина схилу між свердловинами 3а та 1. Грунтова маса, яка може піддатись цьому процесу – це інженерно-геологічний елемент 2д (рис. 7).

Для подальших розрахунків були взяті дані про фізико-механічні властивості ґрунтів (а саме ПГЕ 2д), які були отримані шляхом лабораторно-

го вимірювання в сертифікованій геотехнічній лабораторії ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань». Вимірювання ґрунтів відповідає ДСТУ Б В.2.1-17:2009, результати наведені в таблиці 1.

На розрізі було виділено розрахункову ділянку (рисунок 7), де найперше через перезволоження ґрунтової маси може виникнути такий тип зсуву. Необхідні розрахункові параметри були зняті з розрізу (рисунок 8) та занесені до таблиці 2.

Таблиця 1 / Table 1

Фізико-механічні параметри ПГЕ 2д / Physical and mechanical parameters of the design soil layer

Геологічний індекс	№ ПГЕ	Найменування ґрунту	Стан	Вологість, W д.о.		Вологість на межі	Число пластичності I_p д.о.	Показник текучості I_L д.о.	Щільність			Коефіцієнт пористості, e д.о.	Ступінь водонасичення, S_r д.о.	Кут внутрішнього тертя, ϕ град.	Питоме зчеплення, C КПа	Модуль деформації, E МПа
				Текучості, W_L д.о.	Розкочування, W_p д.о.				Часток, ρ_s г/см ³	Природня, ρ г/см ³	Скелету, ρ_a г/см ³					
тН 2д		насипний ґрунт супісок пилуватий твердий	природній	0,16				0		1,75	1,51	0,762	0,56	17	9	10
			водонасичений	0,279	0,21	0,16	0,05	2,38	2,66	1,88	1,51	0,762	0,92	13	6	7

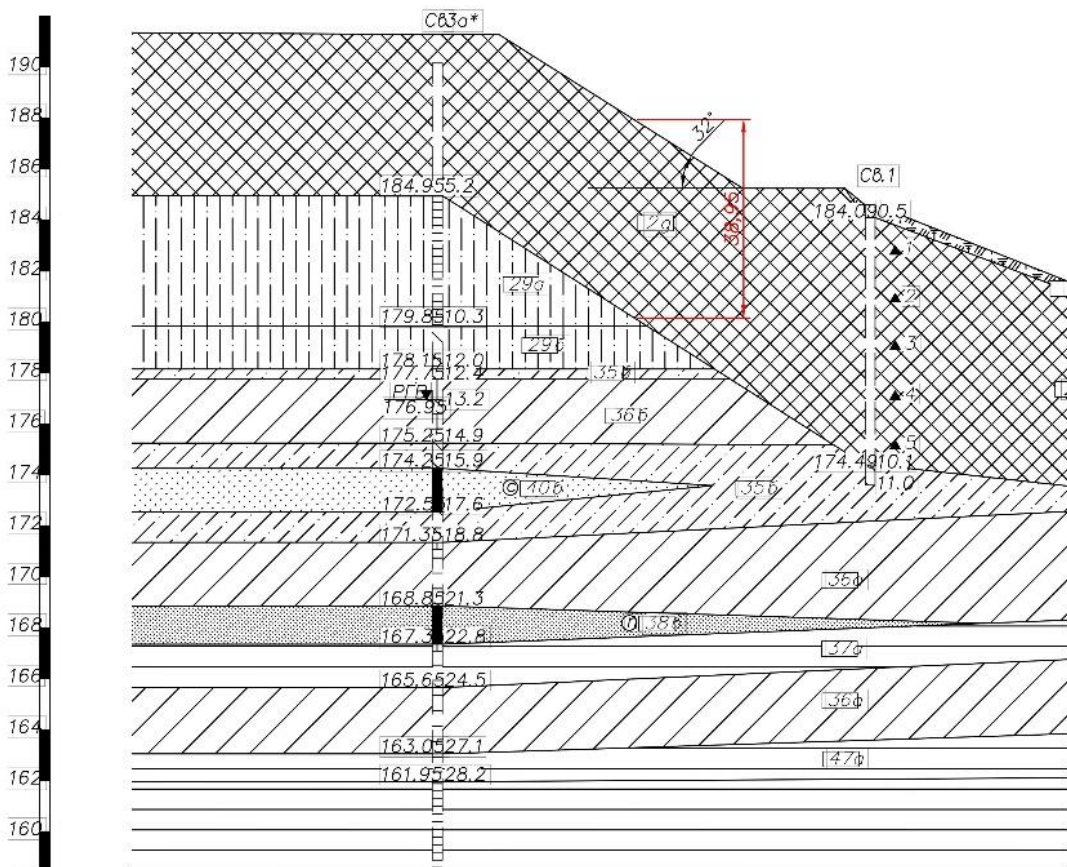


Рис. 8. Розрахункова частина схилу / Fig. 8. Design part of the slope

Вихідні параметри зсувонебезпечної ділянки схилу / Parameters of the landslide-prone slope area

Інженерно-геологічний елемент ІГЕ	Питома вага водонасиченого ґрунту, γ_{sat} , КН/м ³	Кут внутрішнього тертя водонасиченого ґрунту, ϕ_{sat} , град.	Питоме зчеплення, C_c , КПа	Кут схилу α , град.	Потужність розрахункового шару H , м	*Коефіцієнт в'язкості ґрунту η , кгс*с/см ²
2d	18,44	13	6	32	3,9	3*10 ⁴

*Під час вивчення реологічних процесів виявилось, що визначення коефіцієнту в'язкості ґрунту не передбачено жодним нормативним документом в галузі інженерної геології. Тому, в цій роботі було проаналізовано роботи українських вчених з даної тематики. Цей коефіцієнт залежить від характерної особливості пухких водонасичених ґрунтів, а саме через їхню здатність переходити в розріджений стан. Явище розрідження водонасичених ґрунтів – це повна втрата несучої здатності ґрунту та перехід його зі стану твердого тіла в плинний стан. При розрідженні ґрунт веде себе як густа в'язка рідина, яку можна представити у вигляді структурованої суспензії, тобто води з завислими в ній частинками ґрунту. До такого стану насичений водою ґрунт при крутійні доходять тільки в межах зони зсуву, яка має невелику товщину. Для визначення реологічних властивостей структурованих суспензій можна використати модель в'язкопластичного середовища. В ґрунтах залежність між напруженням τ і градієнтом швидкості течії dV/dx – нелінійна, а течія виникає при величині напруження $\tau \geq \tau_0$. При $\tau < \tau_0$ ґрунт веде себе як тверде тіло з незначною величиною деформації, яку можна розглядати як явище повзучості. Це значить, що τ_0 не є статичним, а є динамічною межею напруження зсуву [17]. Так, на основі робіт А.І. Білеуша та інших було, отримано в геотехнічній лабораторії ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань» коефіцієнт в'язкості ґрунту η [17, 19]. Питанню вивчення і визначення даного коефіцієнту в інженерній геології необхідно приділити значну увагу.

За умови значного перезволоження верхньої частини схилу та з отриманих даних за наведеною вище методикою була змодельована ймовірність розвитку реологічного процесу на схилі в парку Вічної Слави у м. Київ. Верхня частину схилу складена насипним супіском, пілуватим, твердим (ІГЕ 2d). Потужність даного ІГЕ коливається в межах 3,0 – 5,2 м, з кутами нахилу поверхні α на схилі від 0 град. у підніжжі та 32 град. у верхів'ї. Саме для верхів'я схилу де найбільший кут нахилу поверхні (що спричиняє виникненню найбільшої дотичної напруги τ_y) і була досліджена ймовірність виникнення такого типу зсуву. Так, за кількісним вираженням вста-

новлена глибина захвату ґрунтової товщі D та визначена швидкість руху сповзаючої маси v_0 :

$$D = \frac{1}{\gamma_{sat} \sin \alpha - \cos \alpha \cdot tg \phi_{sat}} C_c = 1,08 \text{ м}$$

$$v_0 = \frac{\gamma_{sat}}{\eta} \left[H(H - D) - \frac{(H - D)^2}{2} \right] (\sin \alpha - \cos \alpha tg \phi_{sat}) - \frac{C_c}{\eta} (H - D) = 0,75 \text{ м/доб.}$$

Висновки. На основі інженерно-геологічних вишукувань проведених ТОВ «Центр Інженерні Вишукування» в парку Вічної Слави, встановлено: ділянка вишукувань відноситься до III (складної) категорії згідно з ДБН А.2.1-1:2008, саме через наявність схилу та можливості розвитку зсувних процесів. Через це було визначено коефіцієнт стійкості даного схилу (нормативний $K_{st}=1,25$):

- для природного стану ґрунтів коефіцієнт стійкості $K_{st}=1,558$;
- для водонасиченого стану ґрунтів $K_{st}=1,072$.

Можливість повного водонасиченого стану схилу існує більшою мірою теоретично. Відповідно $K_{st}=1,072$ це теоретичне обґрунтування.

Отримані результати вказують на стійкий стан схилу, проте під час обстеження було виявлено незначні деформації сходів через перезволоження ґрунтів. Ці деформації було розглянуто, як зсуви спливання. На основі цієї інформації і було проведено наукове дослідження можливості розвитку реологічних процесів.

Відповідно до теорії реологічних процесів на схилах, було проаналізовано модель Бінгама-Шведова та методику кількісної оцінки Маслова. Отримані результати вказують на можливий процес виникнення зсуву спливання де глибина захвату ґрунтової маси $D = 1,08$ м та швидкість її руху $v_0=0,75$ м/доб.

Результати дослідження вказують на те, що реологічні процеси на схилах мають високу вірогідність утворення. При вивченні схилів, а особливо зсувонебезпечних ділянок необхідно обов'язково досліджувати можливість виникнення зсувів спливання. Також, під час проведення дослідження такого роду процесів, виявлено що необхідно визначати та вводити в нормативні документи такий кількісний критерій ґрунту коефіцієнт в'язкості η .

Список використаної літератури

1. Christensen R. W., Kim J. S. Rheological model studies in clay. *Clays and Clay Minerals*. 1969. Vol. 17. P. 83–93.
2. Cristescu C. *Materials with Rheological Properties: Calculation of Structures*. Wiley, 2008. 288 p.
3. Filipovych V., Lischenko L., Marhes S. Methodology for assessing and forecasting the landslide hazard of the territory of the Dnieper landslide zone in the city of Kyiv based on satellite data. 4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007>.
4. Ghezzehei T. A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*. 2001. Vol. 65, no. 3. P. 624–637.
5. Komamura F., Huang R. J. New rheological model for soil behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1974. Vol. 100, no. 7. P. 807–824.
6. Leschke R. *Rheology in Process Engineering. Dough Rheology and Baked Product Texture*. Boston, MA, 1990. P. 473–495. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0861-4_12.
7. Maslov N.N. *Soil mechanics in construction practice*. M.: Stroiyzdat, 1977. – P. 320.
8. Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides / S. R. Carrière et al. *Landslides*. 2018. Vol. 15. P. 1615–1630.
9. Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria / K. Onyelowe et al. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 8–14.
10. Sheremeta R. REVIEW OF REOLOGICAL MODELS. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*. 2018. No. 22. P. 22–30. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.022>.
11. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 64, no. 1. P. 12011–12011. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>.
12. Zolotarev H.S. *Engineering Geodynamics*. M.: Yzdatelstvo MHU, 1983. – P. 328.
13. Ботанічний сад у Києві під замком через небезпеку. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/966312.html>.
14. Гідрогеологічні особливості розрахунків стійкості укосів і схилів у межах урбанізованих території / О. Кошляков та ін. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. Т. 4, № 83. С. 79–83. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.11>.
15. ДБН А.2.1-1-2008. Інженерні вишукування для будівництва. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008.
16. ДБН В.1.1-46:2017 Інженерний захист території, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017.
17. Дослідження в'язкості ґрунтів на приладі крутіння / А. І. Білеуш та ін. *Прикладна гідромеханіка*. 2014.
18. Зсуви ґрунтів в м. Києві. URL: <https://kpsuppr.kyivcity.gov.ua/files/2023/5/26/perelikzsuviyvKyiv.pdf>.
19. Івіцький І.І., Мікульонок І.О. *Реологія: Практикум*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. Т. 35.
20. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти* / Зоценко М.Л. та ін. *Полтава : ПНТУ*, 2003. Т. 446.
21. Лисенко О.М. Капітальний ремонт сходів парку "Вічна Слава" у Печерському районі м. Києва. *Коригування. Київ : ТОВ "Центр Інж. Вишукування"*, 2023. Т. 39.
22. Парфентьєва І.О., Верешко О.В., Гусачук Д.А. *Основи та фундаменти*. Луцьк : ЛНТУ, 2017. С. 296.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Rheological processes in the slope massifs of the city of Kyiv

Reva Maksym¹

PhD (Geology), Associate Professor of Institute of Geology,
¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Lysenko Oleksandr²

Director ² LLC «Inzhenerni vyshukuvannya», Kyiv, Ukraine;

Chomko Dmytro¹

PhD (Geology), Associate Professor,
Head of the Department Hydrogeology and Engineering Geology

ABSTRACT

Formulation of the problem. The paper examines landslide processes that occurred on the right bank of the city of Kyiv. The authors demonstrate the general statistics of the development of landslides in the city, which is a dangerous phenomenon for the safety of the city. In Kyiv, 42 landslides have been recorded, which are in the active phase. The authors identify the main reasons for the development of landslides as engineering-geological, geomorphological conditions, climate and anthropogenic impact. The article examines the use of GIS technologies as a modern and quite effective method of monitoring landslide processes. The authors focus attention on two landslides that occurred and differ from the rest due to the atypical mechanics of the process, which was affected by the overwetting of the soil mass. It was this difference that led to this scientific research. This theoretical study was conducted on a site in the Park of Vichnoyi Slavy, since by all indicators this slope has the potential for the development of just such a landslide. Overmoistened soil mass has a special mechanics of movement on the slope and is classified as – a landslide flows.

Purpose. The article examines this movement of the overmoistened soil mass on the slope as a rheological process.

Methodic. The authors analyzed the theoretical foundations of soil mass behavior in such conditions, they consider it as a rheological model. The solution to the problem is based on the classical Bingham-Shvedov, Newton, and Maxwell models. The methodology for solving such tasks is given in the study. The authors investigated the necessary parameters of the soil, which are used in the construction of the calculation model. The article highlights the coefficient viscosity of soil, this coefficient deserves special attention when considering rheological processes in the soil. The considered solution model of the rheological process cannot be solved without the coefficient viscosity of soil. Using the scientific work of Ukrainian scientists, the authors determined this coefficient in the laboratory.

The main material. The article investigates the possibility of a landslide occurring on one of the cultural objects in order to preserve the latter. The authors built their research on the basis of engineering investigations, which were carried out for the purpose of reconstructing the stairs in the Vichnoyi Slavy Park in Kyiv. The surveys show an engineering-geological section of the slope, which consists of 14 soil layers. The researchers established that under natural conditions this slope is in a stable state $K_{st}=1.56$. The studies have shown that at this site, with excessive moistening of the upper soil layer, a rheological process may occur. This process can develop in bulk soils (dusty sandy loam) due to its large angles of inclination and rather weak physical and mechanical properties. The article analyzes the possibility of the occurrence of rheological processes on the slopes and their role in the safety and life of the city of Kyiv.

Conclusions. The calculated model is solved and shows the capture depth $D=1,08$ m and speed $V_0=0,75$ m/day of movement of a potential landslide in case of overwetting of the soil on the slope in the Vichnoyi Slavy Park in the city of Kyiv.

Keywords: *rheological processes, landslides, landslide flows, the coefficient viscosity of soil, slope stability, engineering geological layer.*

References

- Christensen, R. W., & Kim, J. S. (1969). Rheological model studies in clay. *Clays and Clay Minerals*, 17, 83–93.
- Cristescu, C. (2010). *Materials with Rheological Properties: Calculation of Structures*. Wiley & Sons, Incorporated, John.
- Filipovych, V., Lischenko, L., & Marhes, S. (2023). Methodology for assessing and forecasting the landslide hazard of the territory of the Dnieper landslide zone in the city of Kyiv based on satellite data. 4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007>
- Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 624–637.
- Komamura, F., & Huang, R. J. (1974). New rheological model for soil behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(7), 807–824.
- Leschke, R. (1990). Rheology in Process Engineering. In J. M. Faridi Hamed and Faubion (Ed.), *Dough Rheology and Baked Product Texture* (pp. 473–495). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0861-4_12
- N.N. Maslov. (1977). *Mechanics of chrunts in construction practice* (Vol. 320). Stroiyzdat.
- Carrière, S. R., Jongmans, D., Chambon, G., Bièvre, G., Lanson, B., Bertello, L., Berti, M., Jaboyedoff, M., Malet, J.-P., & Chambers, J. E. (2018). Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides. *Landslides*, 15, 1615–1630.
- Onyelowe, K., Van, D. B., Igboayaka, C., Orji, F., & Ugwuanyi, H. (2019). Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(1), 8–14.
- Sheremeta, R. (2018). Review of reological models. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, 22, 22–30. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.022>
- Zhu, G., Zhu, L., & Yu, C. (2017). Rheological properties of soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64(1), 12011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
- Zolotarev H.S. (1983). *Engineering neodynamics*, 328. MSU Press.
- Botanical garden in Kiev under the castle through the sky. (n.d.). Retrieved May 24, 2024, from <https://www.radiosvoboda.org/a/966312.html/> [in Ukrainian]
- Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I., & Koshliakova, T. (2023). Hydrogelological peculiarities of calculation of scarps and slopes stability within urbanized territories. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83), 79-83. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.11> [in Ukrainian]
- State Building Standards A.2.1-1-2008. *Engineering research for construction*. (2008). Minrehionbud Ukrainy.
- State Building Standards V.1.1-46:2017 *Engineering protection of the territory, buildings and structures in the form of sliding and collapsing. Basic positions* (2017). Minrehionbud Ukrainy. [in Ukrainian]
- Bileush, A. I., Fridrikhson, V. L., Kryvonoh, O. I., & Kryvonoh, V. V. (2014). Botanical garden in Kiev under the castle through the sky. *Applied Hydromechanics*. [in Ukrainian]
- Landslides in Kyiv (b. d.). <https://kpsuppr.kyivcity.gov.ua/files/2023/5/26/perelikzsuviyvKyiv.pdf>. [in Ukrainian]
- Ivitskyi I.I., & Mikulonok I.O. (2019). *Reolohiia: Praktykum*, 35. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". [in Ukrainian]
- Zotsenko M. L., Kovalenko V. I., Yakovliev A. V., Petrakov O. O., Shvets V. B., Shkola O. V., Bida S. V., & Vynnykov Yu.L. (2003). *Engineering geology. Soil mechanics, foundations and foundations*, 446. PNTU. [in Ukrainian]
- Lysenko O.M. (2023). Major renovation of the Vichna Slava park in the Pechersk district of Kyiv, 39. LLC «Inzhenerni vyshukuvannya». [in Ukrainian]
- Parfentieva I. O., Vereshko O. V., & Husachuk D. A. (2017). *Soil bases and foundations*, 296. LNTU. [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 28 July 2024

Accepted 28 October 2024