

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНІСТЮ ПРИРОДНИХ СХИЛІВ ТА ТЕХНОГЕННИХ УКОСІВ

Ковров О. С., Колесник В. Є.

1. Вступ

Зсувонебезпечність є важливою складовою екологічної безпеки територій, включаючи техногенну, та геомеханіки ґрунтів і м'яких порід, як на регіональному, так і на локальному рівнях.

Природні схили та штучні укоси, що практично завжди присутні на різних територіях, є джерелами потенційної екологічної чи техногенної небезпеки, надзвичайної ситуації чи катастрофи. Під впливом сили тяжіння та техногенних зовнішніх навантажень схили руйнуються, завдаючи значних екологічних, економічних та соціальних збитків. Враховуючи тенденції зміни клімату в світовому та регіональному масштабах, інтенсивність зсувонебезпеки з відповідними екологічними наслідками в природних схилових ландшафтах та в техносистемах зі складним або штучно створеним рельєфом зростає.

Основними факторами впливу на стійкість природних схилів та техногенних укосів є кліматичні та гідрогеологічні показники території, зокрема, кількість атмосферних опадів та рівень водонасичення переважно м'яких суглинчастих порід, а також їх геомеханічні властивості. Господарська діяльність, промислова та цивільна забудова, сейсмічні впливи виступають часто в ролі ініціюючих тригерних факторів зсувів. Аналіз тенденцій поширення зсувів у світі за минуле та поточне сторіччя свідчить про тенденцію зростання їх кількості, масштабів та загибелі людей через катастрофічні наслідки. Щорічно жертвами зсувів у світі стає приблизно 9 тисяч осіб [1]. На сьогоднішній день на території України зафіксовано близько 23 тис. зсувів та їх кількість постійно зростає через перезволоження верхніх шарів нестійких суглинчастих, в тому числі, лесових ґрунтів [2]. Сприятливі умови для активізації зсувів склались в межах забудованих міських територій Вінницької, Дніпропетровської, Донецької, Закарпатської, Івано-Франківської, Київської, Луганської, Одеської, Харківської, Чернівецької та інших областей України.

Зсуви штучного або техногенного походження спостерігаються в укосах уступів та бортах кар'єрів з видобутку корисних копалин, внаслідок технологічних операцій відкритої розробки, при будівництві та експлуатації геотехнічних споруд.

Разом з тим, існуючі методи оцінки зсувонебезпеки природних схилів та техногенних укосів не забезпечують надійне прогнозування моменту виникнення і масштабів надзвичайної ситуації та впровадження упереджувальних заходів.

Виходячи з вищевикладеного, розробка системи управління зсувонебезпечністю природних схилів та техногенних укосів залишається актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячена ця робота.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є управління зсувонебезпечністю природних схилів і техногенних укосів, як чинника екологічної безпеки та стійкості геомеханічних систем.

Схил (укос) є геоморфологічним об'єктом (геооб'єктом), який утворився природним або штучним шляхом і має певні геометричні (висота та кут нахилу) структурні (неоднорідність, шаруватість) та фізико-механічні властивості (зчеплення та кут внутрішнього тертя). Природним схилом є будь-який елемент яружно-балочної мережі. Прикладом штучного укосу є борта кар'єрів, породні відвали та насипи, що утворюються в технологічних процесах відкритої розробки корисних копалин, при цивільному будівництві тощо. На ці геооб'єкти впливає низка природних (клімат, геоморфологія, вологонасичення) та техногенних (статичні та динамічні навантаження, сейсмічні впливи) чинників. Ці впливи порушують стійкість схилів та укосів і підвищують рівень зсувонебезпеки.

Одними з найбільш проблемних місць є відсутність комплексного підходу при вивченні зсувів та недостатній обсяг лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей м'яких суглинистих порід та ґрунтів.

Тому оцінка і прогноз стійкості природних схилів та техногенних укосів в мінливих геокліматичних умовах є ключовим елементом управління їх зсувонебезпечністю. Для забезпечення екологічної та техногенної безпеки.

3. Мета і задачі дослідження

Мета дослідження полягає в підвищенні достовірності прогнозу рівнів зсувонебезпеки природних схилів і техногенних укосів та ефективності управління їх стійкістю для забезпечення екологічної та техногенної безпеки регіонів і локальних територій.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні *задачі досліджень*:

1. Обґрунтувати оціночну шкалу зсувонебезпечності природних схилів і техногенних укосів для подальшого управління їх стійкістю.
2. Розробити систему управління зсувонебезпечністю природних схилів і штучних укосів з неоднорідною структурою в мінливих геокліматичних умовах в регіональному та локальному контексті.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Останнім часом розвиток зсувів в регіонах України має катастрофічні темпи, що пов'язано зі значними економічними і соціальними збитками. Тому сучасні дослідження зсувних явищ в природних ландшафтах та геотехнічних системах спрямовані на підвищення достовірності оцінки стійкості схилів та розробку дієвих заходів моніторингу і управління зсувонебезпечністю. Отже, обґрунтування і впровадження ефективних систем управління зсувонебезпечністю природних схилів та техногенних укосів є важливим прикладним напрямком наукових досліджень в галузі екологічної та техногенної безпеки регіонів та держави в цілому.

Сучасним проблемам стійкості схилів та геодинаміки зсувів в природних екосистемах присвячено ряд досліджень відомих вчених. Так, в роботі [3] висвітлено результати досліджень зсувів в регіональному контексті з урахуванням геоморфологічних та кліматичних особливостей територій. В роботі [4] представлено найбільш відомі класифікації з визначення стійких параметрів укосів на кар'єрах. Але для природних схилів вона є неприйнятною через відсутність екологічної складової рівня зсувонебезпечності. У праці [5] представлені сучасні методи і підходи, які розглядають укоси на кар'єрах в якості складнокомпонентних геотехнічних структур, які мають природні геологічні та геомеханічні властивості. Однак у

представленій методології не враховуються гідрогеологічні характеристики масиву порід, що суттєво впливає на їх міцність. У роботах [6, 7] виконана оцінка стійкості укосів з використанням імовірнісних підходів. Недоліком цих методів є обмежені можливості застосування відомих критеріїв руйнування гірських порід, що викликає сумніви щодо надійності одержуваних результатів.

Для управління ризиками зсувонебезпечних схилів на великих кар'єрах використовуються наземні радари, що забезпечує високу точність при дослідженні стійкості укосів в режимі реального часу [8, 9]. Однак використання геодезичних радарів не дає повної картини деформаційних процесів, що відбуваються в масиві порід в момент обвалення.

Для цілісної оцінки стійкості укосів необхідно враховувати наявність в масиві тріщин або інших порушень суцільності середовища [10], а також рівень ґрунтових вод і вологонасичення масиву порід, що істотно впливає на коефіцієнт запасу стійкості [11]. Цей фактор є ключовим і пов'язаний зі змінами клімату, атмосферними опадами [12] та іншими природними факторами [13], що суттєво впливає на інтенсифікацію природних зсувів.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що тематика прогнозу та управління зсувонебезпечністю є різноплановою та потребує системного підходу.

5. Методи дослідження

При дослідженні були використані наступні наукові методи:

- метод аналізу інформаційних джерел і світового досвіду при формулюванні наукової мети та задач дослідження;
- методи класифікації для оцінки стійкості схилів та укосів;
- методи екологічної оцінки та моніторингу для прогнозу та управління зсувонебезпекою в природних геосистемах та на техногенних об'єктах.

6. Результати дослідження

6.1. Обґрунтування ступінчастої шкали рівнів зсувонебезпечності та відповідної класифікації природних схилів та укосів

Зсувонебезпечність є фактором екологічного та техногенного ризику. Використання відповідних рівнів та градацій стійкості природних схилів та техногенних укосів є ключовим елементом оцінки та прогнозу їх зсувонебезпечності. Стосовно геотехнічних об'єктів відкритої розробки корисних копалин використовуються відомі шкали значень коефіцієнтів запасу стійкості для укосів та бортів кар'єрів, а також відвальних масивів [14]. Для оцінки стійкості природних схилів така градація рівнів зсувонебезпечності відсутня. Тому, зважаючи на статистику активізації та поширення зсувів в світі та Україні, виникає необхідність обґрунтування певної шкали рівнів зсувонебезпечності для оцінки ризику екзогенних геологічних процесів в природних геосистемах.

Як відомо, критерієм оцінки стану природних схилів і техногенних укосів є коефіцієнт запасу стійкості ($KЗС$), який представляє відношення утримуючих $F_{\text{утр}}$ і зсувних $F_{\text{зсув}}$ сил у схилі по поверхні ковзання, тобто:

$$KЗС = F_{\text{утр}} / F_{\text{зсув}}$$

Можливі три стани схилової ділянки породного масиву: при $KЗС > 1,0$ схил стійкий, $KЗС = 1,0$ відповідає граничному стану в момент ініціації обвалення схилу чи укосу, яке переходить в стан обвалення (зсуву) при $KЗС < 1,0$.

Значення $KЗС$ для схилів з м'яких порід можуть варіюватися в широких межах, але для практичного застосування цього показника найбільш доцільно аналізувати розрахункові значення $KЗС$ на інтервалі $[1,0; 2,0]$. За умов комплексного впливу природних та техногенних факторів напруження в схилі зростають, що призводить до змін напружено-деформованого стану масиву схилу. Ці зміни характеризуються певними об'єктивними перетворюваннями в масиві, котрі можуть контролюватися або спостерігатися. Саме це і дозволило встановити градацію стану схилу та запропонувати п'ятиступінчасту шкалу рівнів його зсувонебезпечності (рис. 1).

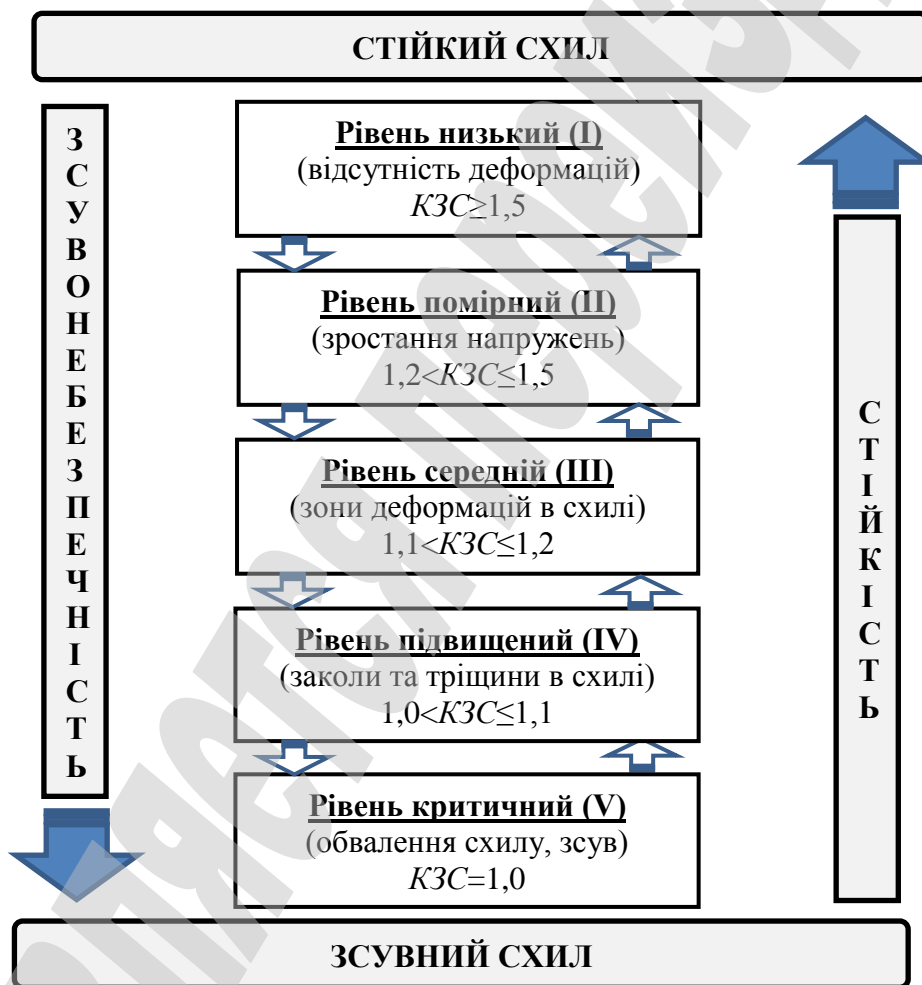


Рис. 1. Зсувонебезпечність та стійкість природних схилів та укосів

Запропонована авторами відповідна класифікація зсувонебезпечності природних схилів та укосів, що спирається на значення $KЗС$, наведена у табл. 1. В результаті чисельного моделювання встановлено, що в однорідних укосах без поверхонь ослаблення суттєві деформації практично відсутні при $KЗС \geq 1,5$ [14, 15]. Цей стан масиву м'яких порід об'єктивно характеризується як найбільш стійкий, отже і рівень зсувонебезпечності «низький», що дозволило віднести такий стан до I класу за запропонованою шкалою. Зрос-

тання напружень у схилі ($1,2 < KЗС \leq 1,5$) призводить до виникнення певних деформацій, рівень зсувонебезпечності «помірний» та віднесений до II класу зсувонебезпечності. За умов подальшого зниження міцнісних властивостей ґрунтового чи породного масиву внаслідок навантажень чи зміни вологонасичення в схилі зростають напруження та виникають окремі зони деформацій. Це дозволило вважати рівень зсувонебезпечності як «середній» та віднести такий стан до III класу за шкалою зсувонебезпечності. Подальший розвиток геомеханічних деформацій ($1,0 < KЗС \leq 1,1$) призводить до заколів та утворення тріщин в схилі, а це дозволило вважати рівень зсувонебезпечності як «підвищений» та виокремити її IV клас. Стан обвалення схилу, при якому $KЗС = 1,0$, запропоновано відносити до максимального рівня зсувонебезпечності – «критичний» та відповідно до V класу.

Таблиця 1

Рівні зсувонебезпечності природних схилів та укосів за значенням $KЗС$

Рівні зсувонебезпечності	Значення $KЗС$, безрозмірний	Клас зсувонебезпечності	Вид небезпеки	Примітка
Низький	$KЗС \geq 1,5$	I	Техногенна	Використовується для техногенних укосів суцільних та насипних порід
Помірний	$1,2 < KЗС \leq 1,5$	II	Техногенна	
Середній	$1,1 < KЗС \leq 1,2$	III	Екологічна	Характеризує екологічну небезпеку від зсувів внаслідок надзвичайної ситуації
Підвищений	$1,0 < KЗС \leq 1,1$	IV	Екологічна	
Критичний	$KЗС = 1,0$	V	Екологічна	

Аналіз запропонованих в [4] рівнів стійкості стосовно робочих укосів кар'єрів та відвалів з м'яких суглинистих порід свідчить, що найменші значення $KЗС$ знаходяться у межах $1,1 \dots 1,2$. Але, слід враховувати, що з часом такі укоси мають тенденцію до руйнування, опливання та розвитку різноманітних зсувних явищ під впливом зовнішніх чинників, переважно атмосферних опадів та перезволоження. Крім того, визначення фізико-механічних характеристик порід в лабораторних умовах має певні недоліки, пов'язані з варіацією значень зчеплення та кута внутрішнього тертя в реальних породах схилів і укосів навіть в межах одного інженерно-геологічного елемента. Варіації міцнісних властивостей і статистична неоднорідність ґрунтів та суглинистих порід можуть вагомо вплинути на результати лабораторних випробувань, і, як наслідок, на розрахунок величини $KЗС$ схилу. Незважаючи на це, запропонована п'ятиступінчаста шкала зсувонебезпечності природних схилів і техногенних укосів, залежно від значень коефіцієнта запасу їх стійкості ($KЗС$) в мінливих геокліматичних умовах. Це дозволяє досить достовірно прогнозувати геомеханічний стан масиву гірських порід та розробляти ефективні заходи інженерного захисту від зсувів.

6.2. Побудова структури системи управління зсувонебезпечністю природних схилів та техногенних укосів

Результати виконаних в роботі досліджень систематизовані у вигляді структурно-логічної схеми, яка базується на сучасних методичних підходах стосовно прогнозу стійкості природних схилів і штучних укосів та управління рівнями їх зсувонебезпечності. Це дало можливість побудувати структуру управління зсувонебезпечністю схилів та укосів, наведену на рис. 2.

СТРУКТУРА УПРАВЛІННЯ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНІСТЮ ПРИРОДНИХ СХИЛІВ ТА ШТУЧНИХ УКОСІВ

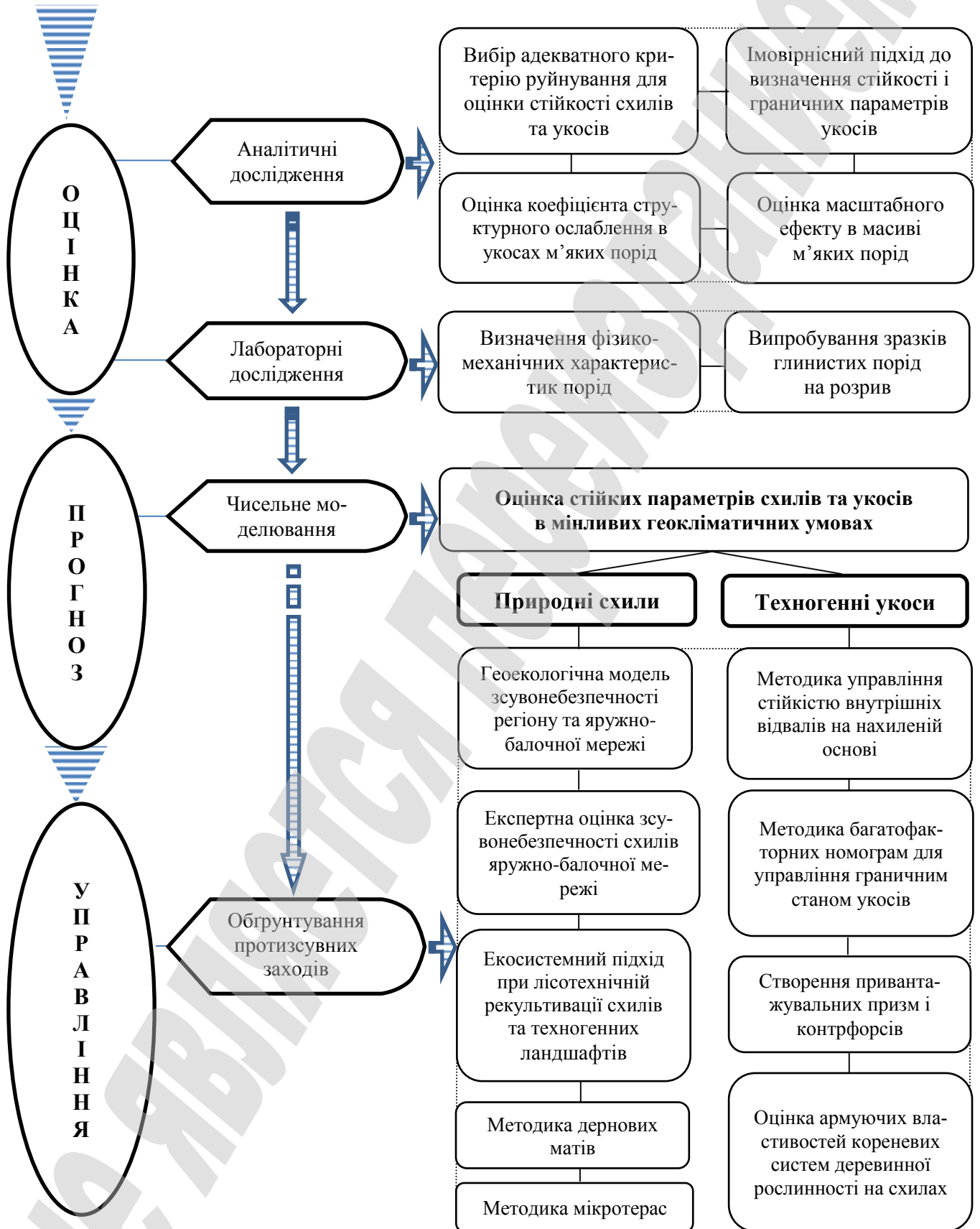


Рис. 2. Структура управління зсувонебезпечністю схилів та укосів

Запропонована, логічно побудована та апробована на практиці структурна схема управління зсувонебезпечністю поєднує три модулі: оцінка, прогноз та управління. Кожен з цих модулів базується на певному наборі методичних підходів, що дозволяє вирішувати наукові задачі стосовно прогнозу зсувонебезпечності схилів.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. У порівнянні з аналогічними підходами стосовно стійкості природних схилів та техногенних укосів запропоновано комплексну методологію, яка базується на результатах аналітичних і лабораторних досліджень, чисельного моделювання та використанні інноваційних протизсувних заходів. Це дозволяє надійно управляти зсувонебезпечністю.

Weaknesses. До слабких сторін запропонованої системи управління зсувонебезпечністю слід віднести складнощі щодо лабораторного визначення міцнісних властивостей ґрунтів та суглинистих порід. А також їх статистична неоднорідність, що різною мірою впливають на результати розрахунку достовірних значень $KЗС$ схилу. Тому для надійного інженерного розрахунку стійкості схилів доцільно використовувати ймовірісно-статистичні підходи.

Opportunities. Використання запропонованої системи управління зсувонебезпечністю дозволяє обґрунтовувати стійкі параметри геотехнічних об'єктів (техногенних укосів) при відкритій розробці корисних копалин з урахуванням геометричних параметрів, фізико-механічних характеристик, обводнення масиву порід та зовнішніх навантажень. Для природних схилових ландшафтів використання комплексного підходу є ефективним інструментом визначення умов зсувів.

Threats. Незважаючи на отримані цілком достовірні результати оцінки та прогнозу зсувонебезпечності, відповідальні державні структури ставляться до таких досліджень та впровадження протизсувних заходів з певним скепсисом через брак цільових коштів та невизначеність часових рамок виникнення зсуву. Як правило, фінансування протизсувних заходів відбувається на етапі ліквідації наслідків надзвичайної події чи катастрофи.

8. Висновки

1. Показано, що рівень зсувонебезпечності природних схилів та техногенних укосів визначається змінами коефіцієнта запасу їх стійкості ($KЗС$), який обумовлений впливом геометричних, геомеханічних і геокліматичних чинників. Це дозволило обґрунтувати п'ятиступінчасту шкалу зсувонебезпечності природних схилів та укосів з класифікацією рівнів, класів і видів небезпеки, що спирається на значення $KЗС$.

2. Запропонована та логічно побудована структурна схема управління зсувонебезпечністю на регіональному та локальному рівнях, яка поєднує три модулі: оцінка, прогноз та управління. Кожен з цих модулів базується на певному наборі методичних підходів, що дозволяє вирішувати наукові задачі стосовно прогнозу зсувонебезпечності схилів.

Література

1. Petley D. Global patterns of loss of life from landslides // *Geology*. 2012. Vol. 40,

Issue 10. P. 927–930. doi: <http://doi.org/10.1130/g33217.1>

2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2014 році / за ред. Бондаря О. І. та ін. Київ: Грінь Д. С., 2016. 350 с.

3. Инженерная геодинамика Украины и Молдовы (оползневые геосистемы): в 2 т. / под ред. Рудько Г. И., Осиюка В. А. Черновцы, 2012. Т. 2. 744 с.

4. Гальперин А. М. Геомеханика открытых горных работ: Москва, 2003. 473 с.

5. Fleurisson J.-A. Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 46. P. 27–38. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.442>

6. Hamedifar H. Role of Probabilistic Methods in Sustainable Geotechnical Slope Stability Analysis. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2014. Vol. 9. P. 132–142. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.009>

7. Luo N., Bathurst R. J., Javankhoshdel S. Probabilistic stability analysis of simple reinforced slopes by finite element method // *Computers and Geotechnics*. 2016. Vol. 77. P. 45–55. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.04.001>

8. Development and application of a pseudo-3D pit slope displacement map derived from ground-based radar / Severin J. et. al. // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 181. P. 202–211. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.016>

9. Osasan K. S., Stacey T. R. Automatic prediction of time to failure of open pit mine slopes based on radar monitoring and inverse velocity method // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014. Vol. 24, Issue 2. P. 275–280. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.01.021>

10. Stability analysis of seismic slopes with cracks / Zhao L.-H. et. al. // *Computers and Geotechnics*. 2016. Vol. 77. P. 77–90. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.04.007>

11. Stability analysis of slopes with ground water during earthquakes / Lu L. et. al. // *Engineering Geology*. 2015. Vol. 193. P. 288–296. doi: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enggeo.2015.05.001>

12. Gariano S. L., Guzzetti F. Landslides in a changing climate // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 162. P. 227–252. doi: <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

13. Дифференциация факторов устойчивости техногенно нагруженных лессовых склонов методом математического моделирования фильтрационных процессов / Садовенко И. А., Подвигина Е. О., Загриценко А. Н. // *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2013. Т. 18, Вип. 1. С. 147–154.

14. Influence of watering filled-up rock massif on geomechanical stability of the cyclic and progressive technology line / Kovrov O. et. al. // *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10, Issue 2. P. 55–63. doi: <http://doi.org/10.15407/mining10.02.055>

15. Геомеханическая оценка устойчивости оползневого склона методом конечных элементов / Сдвижкова Е. А., Ковров А. С., Кирияк К. К. // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. № 2. С. 86–92.