

УДК 551.4

О. Іванік, д-р геол. наук, доц.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна,
E-mail: om.ivanik@gmail.com

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА РЕГІОНАЛЬНОМУ ТА ЛОКАЛЬНОМУ РІВНІ: ПРИНЦИПИ, МЕТОДИ, МОДЕЛІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії доктором геол.-мінералог. наук, проф. В.В. Шевчуком)

Визначення пріоритетності факторів виникнення небезпечних явищ на окремих ділянках функціонування відповідних техногенних систем повинно здійснюватись через інтегрований аналіз якісних і значною мірою кількісних даних з геолого-геоморфологічної будови території та фізико-географічних умов формування цих явищ. Основна мета – науково-обґрунтоване виділення локальних ділянок можливого формування небезпечних геологічних процесів та моделювання їх впливу на функціонування природно-техногенних систем, для яких застосовуються методи детермінованого моделювання і прогнозу. Проведено аналіз світового досвіду у виконанні регіонального та локального прогнозування зсувної небезпеки на основі комплексного підходу. Регіональне прогнозування зсувної небезпеки базується на поєднанні стохастичного та детермінованого підходів та має високу надійність отриманих результатів. На основі локальних прогнозів досліджується природа зсувних процесів, визначається їхня локалізація та взаємодія із інженерними спорудами. Наведено прогнозно-еталонну модель оцінки зсувної небезпеки у межах Карпатського модельного полігону. Для визначення прогнозно-еталонних ознак зсувів, пріоритетності та інформативності факторів їх формування використано технології ГІС, що передбачали створення інформаційної бази концептуальної моделі регіону із сукупністю картографічних шарів і баз атрибутивної інформації. Виконано порівняльний аналіз методів локального прогнозування зсувної небезпеки та підтверджено, що одним із важливих критеріїв оцінки стабільності схилу є напружено-деформований стан (НДС) породного масиву. Для зсувонебезпечних схилів із змінними параметрами водонасичення здійснено постановку задачі розрахунку НДС та визначення ступеня схематизації (формалізації) розрахунків.

Ключові слова: зсувна небезпека, прогноз, геоінформаційні системи, напружено-деформований стан.

Вступ та постановка проблеми. Просторовий та часовий прогноз розвитку зсувних процесів виконується за різними підходами та методичним забезпеченням, де враховано узагальнюючі чинники та особливості їх формування на регіональному та локальному рівні. Теоретичні обґрунтування прогнозів і механізмів зсувів із використанням різних принципів і підходів розглянуто у роботах Г.С. Золотарьова, Є. Ємельянова, І.Ф. Єриша, Г.І. Рудька, І.К. Фоменка, Є.О. Яковлева та інших. Базові принципи та підходи аналізу процесів та чинників зсувоутворення, встановлення їх закономірностей та розробки інформаційно-аналітичних систем визначено у роботах Е.Д. Кузьменка, І.К. Фоменка, К. Фостера та багатьох інших [4, 8, 12, 15, 17, 19]. Ці автори встановили закономірності виникнення або активізації зсувних явищ при одночасному комплексному впливі просторових і тимчасових природно-техногенних факторів, розробили алгоритми реалізації прогнозу зсувів на кількісному ймовірнісному рівні.

Визначення пріоритетності факторів виникнення небезпечних явищ на комплексній основі за конкретними крупномасштабними геолого-геоморфологічними та гідрометеорологічними даними на окремих ділянках функціонування відповідних техногенних систем – задача далека до розв'язання. Вона має вирішуватись через інтегрований аналіз якісних і значною мірою кількісних даних з геолого-геоморфологічної будови території та фізико-географічних умов формування цих явищ. Основна мета цього – науково-обґрунтоване виділення локальних ділянок можливого формування небезпечних геологічних процесів та моделювання їх впливу на функціонування природно-техногенних систем, для яких можна застосувати методи детермінованого моделювання і прогнозу.

Інтегрований аналіз, комплексна оцінка та інтерпретація різномірної інформації для регіонального і локального прогнозу поширення небезпечних геологічних процесів інструментально забезпечується застосуванням ГІС-технологій з їх потужними обчислювальними ресурсами та інформаційною методологією. Світовий досвід використання геоінформаційних технологій для картування та дослідження зсувів вказує на значну поширеність методик просторового аналізу та статистичного інструментарію ГІС. За останні роки було розроблено різні методи комплексного аналізу геологічного середовища з метою прогнозування зсувів різного генезису. Так як більшість методів потребують комплексно-

го аналізу значних обсягів даних, більшість дослідників впроваджують свої розробки у ГІС-середовище. Загальноприйняті методи базуються на створенні тривимірних моделей досліджуваних територій, об'ємної деталізації зсувонебезпечних схилів за допомогою фотограметричної обробки даних дистанційного зондування, наземної або повітряної лідарної зйомки, GPS- картування. Встановлюються природні та антропогенні чинники, що впливають на формування або активізацію зсувів, визначаються кількісні співвідношення такого впливу. У подальшому створюються у середовищі ГІС виокремлені карти (шари) кожного з чинників та проводиться інструментальними засобами ГІС багатофакторний оверлейний аналіз з формуванням результативних карт ймовірності виникнення зсувів у якісній або кількісній градації [18-19, 21, 24-25, 27]. В основі всіх методів ГІС-аналізу зсувної небезпеки лежить цифрова модель рельєфу (DEM).

Принципи та методи регіонального та локального прогнозування зсувної небезпеки. Загалом регіональний прогноз зсувних процесів передбачає визначення можливості виникнення та інтенсивності їх розвитку, а також впливу на інженерні споруди різного призначення у межах певного району. Регіональне прогнозування може бути як якісним, так і кількісним і проводиться як за допомогою стохастичних, так і детермінованих методів. В основі регіональних прогнозів – спеціальне районування території, що характеризує поширення зсувів чи умови їх виникнення та активізації. До класу методів якісного прогнозування зсувної небезпеки належать методи, що базуються на експертних оцінках та методи оцінки стійкості території в балах. Кількісний прогноз базується на детермінованому та стохастичному підходах [26]. До методів прогнозу зсувної небезпеки, що базуються на детермінованих моделях, належать групи методів оцінки прояву зсувних процесів та методи аналогій. До існуючих методик регіонального прогнозування зсувів належать такі як: методика прогнозування за допомогою методу логічного повернення до попереднього стану [20]; методика із залученням ROC аналізу (receiver operating characteristic curve analysis) [22]. У цих випадках середовище ГІС використовується не тільки для введення та збереження даних та візуалізації інформації, а й для проведення спеціальних розрахунків, для яких створюються спеціальні додатки. До методів прогнозу зсувної небезпеки, що

використовують статистичні методи, належать методи геодинамічного потенціалу, регресійного аналізу, багатовимірної статистики та інші.

Прикладом регіонального прогнозування може слугувати система прогнозування зсувів Великої Британії із розробленою потужною Національною базою даних, створеною на геоінформаційній основі Геологічною службою цієї країни (BGS), де фіксуються всі моніторингові дослідження стану зсувонебезпечних ділянок, удосконалюються методики та прогнозні алгоритми, вивчаються критичні напруження у межах породних комплексів [19]. Національна база даних зсувів Великої Британії охоплює інформацію щодо виникнення та активізації більше ніж 14 000 зсувів у межах Англії, Шотландії та Уельсу, кожний із яких характеризується 35-ма атрибутами. Першоджерелом інформації є національна цифрова геологічна карта масштабу 1:10000 та 1:50000. Дані зберігаються у повністю сумісній БД ORACLE, доступ до якої може здійснюватись через інтерфейс програм Microsoft Access або ArcGIS. На основі цієї бази даних виконується оцінка ризиків зсувної небезпеки за допомогою системи GeoSure, методологія якої використовує як детермінований, так і евристичний підходи. Евристичний підхід має не меті експертну оцінку та класифікацію ризиків, а також визначення можливих чинників зсувоутворення. За допомогою детермінованого підходу визначається вплив кожного з факторів на стійкість схилів, у межах яких відбуваються зсувоутворення. На основі аналізу геологічних та гідрометеорологічних даних із застосуванням цих підходів створена карта зсувної небезпеки Великої Британії (рис. 1).

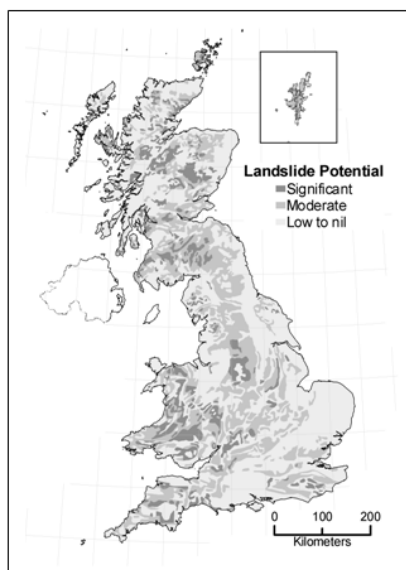


Рис. 1. Карта зсувної небезпеки Великої Британії, за [19]

У США Геологічною службою (USGS) виконується Національна програма оцінки зсувної небезпеки, за якою створено цифрову карту зсувної небезпеки цієї країни. У межах цієї карти територію класифіковано за трьома категоріями згідно відсоткової частки охоплення зсувним процесом. За програмою проводиться комплекс досліджень з моніторингу, вивчення багатфакторності зсувних процесів та розробки ефективних засобів щодо реагування на надзвичайні ситуації. Значна частина геологічних досліджень у цьому напрямку ведеться по окремих штатах та регіонах, зокрема, на локальному рівні, що безумовно підвищує точність прогнозування. Фахівцями Геологічної служби організовано інструментальні спостереження зсувного процесу у межах станцій спостереження, що виконується у режимі реального часу та доступний для перегляду в on-line.

Для моделювання зсувів та оцінки ризиків використовуються спеціалізоване програмне забезпечення SLAMMER, TRIGRS, PTCOUNT та інше.

В Японії оцінка ступеня зсувної небезпеки ґрунтується на багатофакторному аналізі та застосуванні низки статистичних методів, що дозволяють будувати карти прогнозу зсувної небезпеки із врахуванням геологічних, геоморфологічних, кліматичних та техногенних факторів, а оцінка просторового поширення зсувів виконується у ГІС-середовищі. Застосування ГІС-технологій із потужними можливостями просторового та геостатистичного аналізу є характерним для регіональних досліджень у межах Канади, Італії, Індії, Індонезії та багатьох інших країн.

Прикладом прогнозування зсувної небезпеки у межах України можуть слугувати дослідження, проведені автором у межах Карпатського модельного полігону у Свалявському та Воловецькому районах Закарпатської області. Побудова прогнозно-еталонної моделі та створення банку критеріїв і ознак водно-гравітаційних процесів, необхідних для виявлення ймовірних ділянок поширення цих несприятливих явищ, проводились на основі геологічних досліджень, аналізу і систематизації фактичного матеріалу по зсувних процесах. Ці дослідження підтвердили, що специфічні ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні умови формування небезпечних геологічних процесів у межах певних територій диктують особливі підходи і методи просторово-часового їх прогнозування на локальному та регіональному рівнях із обов'язковим залученням даних польових спостережень та використанням потужного інструментарію ГІС. Головним завданням є створення прогнозно-еталонної моделі відповідних геологічних об'єктів (зокрема, зсувів), що представляє собою класифікатор ознак (чинників) виникнення несприятливих геологічних явищ. Інформативність цих чинників визначається через кількісні характеристики ступеня впливу кожного з них на формування зсувів. У основі цієї моделі – опрацьована різноманітна картографічна інформація по району досліджень, статистичні дані, результати особистих польових спостережень, кадастри небезпечних геологічних явищ тощо [2, 7, 23 та ін.]. Безумовно, якість використаних в еталонній моделі опрацьованих даних та процеси формалізації вихідної та модельної інформації забезпечують ефективність застосування такої моделі.

Для визначення прогнозно-еталонних ознак зсувів, пріоритетності та інформативності факторів їх формування було використано технології геоінформаційних систем, що передбачають створення інформаційної бази концептуальної моделі регіону із сукупністю картографічних шарів і баз атрибутивної інформації, відповідною організації даних щодо можливих факторів виникнення сучасних екзогенних небезпечних геологічних процесів. Для побудови концептуальної прогнозно-еталонної моделі використано програмний продукт ArcGIS 9.1 фірми ESRI та його спеціалізовані модулі, перевага яких полягає у добре розвинутому інструментарії створення та обробки растрових і векторних моделей даних, особливо в області засобів оверлейного аналізу та алгебри карт, які і були використані у даних дослідженнях.

Морфометричні параметри зсувних тіл з характеристиками їх форми, ширини, довжини, об'єму зсувних мас, площі поширення, характеристик зсувних схилів, часу їх виникнення тощо склали основу атрибутивної таблиці даних щодо зсувів на полігоні, створеної на основі власних польових спостережень та фондових матеріалів [2].

Зсуви класифіковано за наступними параметрами: час виникнення з виокремленням стабілізованих давніх та сучасних. Таке ранжування виконано на основі аналізу особистих спостережень при польових дослідженнях. Аналіз факторів формування водно-гравітаційних процесів та просторовий прогноз їх виникнення потребували ство-

рення реляційної бази геоданих, яка містила поєднану картографічну та атрибутивну інформацію щодо прогнозних ознак виникнення зсувів. Для побудови цієї геобаз даних, що об'єднувала набори класів об'єктів, автономні об'єктні класи, класи просторових об'єктів, класи відношень та атрибутивні домени, використовувались загальні принципи побудови аналогічних баз. Одним із факторів формування водно-гравітаційних явищ є літолого-стратиграфічна складова породних комплексів. Для просторового аналізу існуючих зсувів здійснено векторизацію крупномасштабних геологічних карт території, що досліджувалась, з виділенням просторових об'єктів полігонального типу геометрії, які відображали вікову характеристику породних комплексів та їх літологічний склад.

На основі поглибленого геологічного аналізу із залученням натурних даних досліджено роль літологічного, стратиграфічного, структурно-тектонічного, геоморфологічного та гідрометеорологічного факторів. Засобами рекласифікації спеціалізованого модуля Spatial Analyst (ArcGIS) здійснено ранжування кожного фактора за ступенем впливу на зсувоутворення та придатності виділених об'єктів відповідно до створеної концепції оцінки території. Кожний об'єкт (зсув) оцінено щодо відповідності заданим умовам. Підґрунтям є багатомірні моделі, в якій окремі характеристики об'єктів відповідним

чином розміщено у різних шарах ГІС. З метою визначення впливу кожного з факторів на формування зсувів виконано розрахунки вагових коефіцієнтів (коефіцієнтів інформативності). Для цього проведено процедури статистичного аналізу за методикою Е.Д. Кузьменка зі співавторами [15], обчислено парні коефіцієнти кореляції між параметрами зсувоутворення. Слід зазначити, що призначення вагових коефіцієнтів на етапі виконання аналізу потребувало певних уточнень та корегувань у процесі моделювання. Це продиктовано необхідністю поетапного групування факторів та використання результатів експертної оцінки з врахуванням даних аналітичних та польових спостережень. Всі охарактеризовані фактори комбіновано для створення загальної інтегральної прогнозної карти, що враховує розглянуті чинники для кожного місця розташування. Інтегральна карта зсувонебезпеки (рис. 2) створена методом оверлейних перетворень матричної моделі даних, що дає можливість одночасного врахування розглянутих факторів, отримання принципово нової просторової інформації та відповідної реалізації комплексної моделі зсувонебезпеки району. Отримані результати стосуються загального впливу геолого-геоморфологічних та ландшафтно-кліматичних факторів на формування зсувних явищ.



Рис. 2. Прогнозна інтегральна карта зсувонебезпеки Карпатського модельного полігону:
1 – ділянки з низькою ймовірністю формування зсувів; 2 – ділянки мінімальної зсувонебезпеки;
3 – ділянки із середнім потенціалом виникнення зсувів; 4 – ділянки високої зсувонебезпеки

Однак, проведення генетичного аналізу зсувів, вивчення їхньої динаміки та режиму можливе тільки при детальних дослідженнях, визначенні пріоритетності впливу кожного з факторів на процес зсувоутворення. Саме такі роботи становлять основу локального прогнозування зсувної небезпеки.

На основі локальних прогнозів досліджуються певні типи схлизових процесів, визначається їх локалізація та взаємодія із конкретними інженерними спорудами. Вони глибше оцінюють природу зсувного процесу, мають найбільше практичне значення і, як правило, здійснюються комплексом методів.

Локальний прогноз стійкості схилів повинен передбачати аналіз зміни стану схилу з урахуванням неоднорідності та зміни факторів зсувоутворення. Він проводиться двома послідовними етапами [17]:

- прогноз змін факторів зсувоутворення (навантажень на схил, властивостей порід та ін.);
- аналіз стану схилу та його окремих морфологічних елементів у залежності від змін факторів зсувоутворення.

При локальному прогнозуванні зсувної небезпеки можуть вирішуватись два види задач:

- розрахунки стійкості з метою оцінки небезпеки розвитку зсувного процесу;

- оцінка динаміки стану схилу (у тому числі, оцінка швидкості зміщення зсувних мас).

При вивченні локальної стійкості зсувів широке застосування знаходять наступні три класи методів:

- методи аналогій;
- методи фізичного моделювання;
- методи математичного моделювання.

Методи аналогій базуються на понятті ізоморфізму та ізомірності інженерно-геологічних умов [14]. Вони включають метод натурального моделювання та порівняльний кількісний підхід. Обмежене використання цих методів пов'язане переважно із відсутністю необхідної кількості природних аналогів, для яких існує достатня інформація про геологічну будову, обводненість, властивості гірських порід, що пояснюється унікальністю умов конкретних схилів та відповідним протіканням зсувного процесу.

Методи фізичного моделювання передбачають відтворення у фізичній моделі тих же фізичних полів, що діють і в об'єкті природи, лише змінених за своїми абсолю-

тими значеннями відповідно до масштабу моделювання. Однією з основних переваг фізичного моделювання є можливість здійснення прямих спостережень за процесами і явищами, які моделюються, іноді ця перевага є вирішальною. Перевага лабораторних методів полягає у дослідженні та встановленні фізико-механічних властивостей породних комплексів, що є основними даними для наступного математичного моделювання та чисельних розрахунків напружено-деформованого стану породних комплексів. У основі методів моделювання лежить вчення про подібність з метою геомеханічного моделювання процесів, що відбуваються у породних комплексах схилів, використовуються методи еквівалентних матеріалів, відцентрового моделювання, поляризаційно-оптичний метод, електроаналогові методи та інші. При вирішенні завдань прогнозування стійкості схилів використовують також методи, що являють собою комбінації різних принципів моделювання, наприклад принципів відцентрового моделювання та поляризаційно-оптичного методу або методу еквівалентних матеріалів і відцентрового моделювання [11]. У цілому лабораторні методи дозволяють отримати хороші результати в однорідному чи рівномірно шаруватому середовищі, однак для породних масивів складної геологічної будови створення таких моделей викликає певні труднощі. Тому останнім часом все більшого використання набувають розрахункові методи прогнозу зсувної небезпеки.

За допомогою методів математичного моделювання при прогнозі зсувної небезпеки можуть вирішуватись дві проблеми – оцінка стійкості схилів та динаміка розвитку зсувного процесу. За узагальненою класифікацією ці методи поділяються на групу традиційних методів та групу чисельних методів аналізу. До першої групи входять методи граничної рівноваги, методи кінематичного аналізу та методи статистичного аналізу зрушення. До другої групи належать методи, що базуються на механіці суцільного середовища, методи механіки дискретного середовища та гібридні методи [17].

Серед загальноживаних методів оцінки стійкості схилів та визначення зсувного тиску слід відмітити такі: метод круглоциліндричної поверхні, метод горизонтальних сил (Маслова-Берера, Маслова та ін.), аналітичний метод Г.М. Шахунянца, метод Л.П. Ясунаса та ін.

У нормативних документах [5] рекомендовано метод розрахунку стійкості схилу (укосу), складеного однорідними ґрунтами. При наявності на схилі споруд вагою P_c і наявності вище поверхні ковзання ґрунтової води коефіцієнт стійкості схилу пропонується визначати за такою формулою:

$$K_c = \frac{\sum_i [(P_i \cos \alpha_i + P_c \cos \alpha_c) \tan \phi_i + c_i I_i] R}{\sum_i [9,8(S_1 + S_2) e \gamma + P_c d + G a] + 9,8 \gamma_w \sum_i S_2 I_i a_f},$$

де P_i – вага ґрунту в межах розрахункового i -го елемента ($P_i = S_1 \gamma + S_2 \gamma_f$), Н/м; α_i – кут нахилу поверхні ковзання до горизонту в межах розрахункового i -го елемента, град; P_c – сумарне навантаження на схил у межах розрахункового елемента від будинків, споруд, тощо, Н/м; α_c – кут між вектором сили P_c і напрямком від середини розрахункового елемента на поверхні ковзання до центру, град; ϕ_i та c_i – кут внутрішнього тертя, град, і питоме зчеплення ґрунту, МПа, на поверхні ковзання в межах розрахункового елемента; I_i – довжина розрахункового елемента за напрямком поверхні ковзання; R – радіус поверхні ковзання; S_1 і S_2 – площа перерізу розрахункового елемента, що зайнята фільтраційним потоком і природної вологості, м²; e – плече дії ваги розрахункового елемента відносно центра по-

верхні ковзання, м; γ і γ_f – щільність ґрунту природної вологості і в межах об'єму, що зайнятий фільтраційним потоком, кг/м³; γ_w – питома щільність води, кг/м³; a і d – плечі дії горизонтального зусилля G і ваги P_c відносно центру кривої ковзання; G – горизонтальне зусилля, що прикладене до споруд у межах розрахункового елемента, Н/м; I_i – гідралічний градієнт; a_f – плече дії фільтраційного тиску, м, в розрахунковому елементі.

Безумовно, представлені методи вирішують велику частину прикладних завдань щодо забезпечення надійності споруд, однак вони значною мірою схематизують геологічні умови та структурні особливості схилів. Значну проблему становить визначення поверхні ковзання. Частково вона вирішується за рахунок застосування геофізичних методів, зокрема вертикального електричного зондування або зондування становленням електромагнітного поля, які встановлюють як положення поверхні ковзання, так і її тип [3].

Разом з тим, мають бути враховані і максимально використані такі важливі фактори, як розподіл напружень у породах схилу, неоднорідність геологічної будови, тріщинуватість, відмінність у механічних властивостях різних частин масиву тощо. Вимагають подальшого вивчення і удосконалення методи розрахунків стійкості неоднорідних схилів, за допомогою яких можна було би встановити вплив усіх чинників, що впливають на стійкість.

Оскільки, одним із важливих критеріїв оцінки стабільності схилу є напружено-деформований стан (НДС) породного масиву, то для оцінки формування зсувів ці дослідження є важливим етапом. Проблеми розрахунків НДС породних масивів на основі різних підходів та методик викладено у численних роботах [1, 6, 9-11, 13, 16, 21]. Вирішення цієї задачі включає декілька етапів, що охоплюють порівняльний аналіз величин і показників міцності там, де за геологічними даними можна очікувати небезпеку у відношенні стійкості зон і контактів; виявлення зон підвищених напружень, що формуються поблизу поверхні схилів, вздовж крупних тріщин тощо; визначення впливу тектонічних та інших тріщин різного напрямку на розподіл напружень в масиві порід; аналіз зміни розподілу напружень у масивах порід схилів у результаті ерозійних врізів за новітній час та при співвідношенні в річковій долині.

В останні роки розроблені та інтенсивно удосконалюються потужні програмні обчислювальні комплекси для розв'язків великих класів задач механіки суцільних середовищ чисельними методами. Ці програмні комплекси, разом із універсальністю, володіють інтерфейсом, який є зручним для користувача як при побудові моделей, так і при наочному аналізі отриманих результатів. Ці програмні продукти є практичним засобом для оцінки стійкості схилів та напружено-деформованого стану масивів гірських порід із застосуванням чисельних методів розв'язків. Переважно у цих програмах для розрахунків параметрів напружено-деформованого стану застосовується метод скінченних елементів. Слід виокремити такі програмні розробки: **Ansys** – універсальний скінченноелементний програмний пакет, що дозволяє вирішувати задачі в областях: міцності та оцінки поведінки масивів гірських порід, **Plaxis 2D (Plaxis 3D Foundation, Plaxis 3D Tunnel)** – програма для розв'язку задач механіки ґрунтів; **FLAC 2D (FLAC 3D)** – найбільш універсальна програма, яка широко використовується для гірничо-геомеханічних та геотехнічних досліджень, включає багато вбудованих геомеханічних моделей, також дозволяє створювати та інтегрувати користувацькі моделі; **FLAC Slope** – окремі модулі програми FLAC, призначені для оцінки стійкості схилів; **ABAQUS** – один з найпотужніших пакетів для проведення всебічного скінченноелементного аналізу, є повністю універсальним та дозволяє вирішувати задачі як моде-

лювання механізмів та конструкцій, так і масивів гірських порід у тривимірному моделюванні.

Слід зазначити, що наведені програмні комплекси володіють певною універсальністю, однак з певними проблемами застосовуються для конкретних умов, не завжди здатні врахувати вагомі фактори виникнення процесів. Це вимагає застосування особливих підходів до моделювання стійкості окремих зсувонебезпечних схилів, що характеризуються особливими умовами будови породного масиву та перебігу небезпечних процесів.

Визначення напружено-деформованого стану порід у межах окремого зсувонебезпечного схилу повинно виконуватись із врахуванням низки геологічних та геоморфологічних факторів. У межах Карпатського регіону для зсувонебезпечних схилів здійснено постановку задачі розрахунку НДС та визначено ступінь схематизації (формалізації) розрахунків [23].

Розрахунково-аналітична модель впливу процесів, спричинених сукупними природними факторами на стійкість інженерних споруд передбачає оцінку великої кількості факторів, що впливають на перебіг даних процесів.

Основні зведені фактори, що беруться до уваги при побудові фізичної і математичної моделей та розрахунках на основі алгоритмічної схеми математичної моделі, є вологість породи; дія гравітаційного поля Землі; зведений тип породи (в межах розглядуваного масиву) з притаманними йому термомеханічними характеристиками – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт лінійного розширення, густина, межа текучості; граничні умови на границі розглядуваного масиву (по переміщенням чи напруженням); геометричні характеристики вибраного масиву (розміри, кут нахилу схилу). Також при розрахунках враховується, що залежно від фактору вологості змінюються термомеханічні характеристики породи.

При побудові фізико-геологічної моделі приймаємо такі гіпотези:

1) обмежуємось розглядом скінченного масиву, відкидаючи все, що знаходиться за його межами, вважаючи, що прикладені на границі масиву зусилля компенсують зовнішній вплив;

2) приймається гіпотеза суцільності матеріалу масиву;

3) приймається гіпотеза про малі деформації, що виникають внаслідок діючих силових, температурного, гравітаційного факторів, тощо;

4) вважаємо поведінку матеріалу масиву термопружно (реологічний закон записується у вигляді співвідношень Дюганеля-Неймана);

5) вважаємо, що по відношенню до матеріалу масиву справедлива гіпотеза про лінійність деформацій (в співвідношеннях між переміщеннями та деформаціями нехтуємо членами вище першого порядку).

У рамках математичної моделі розглядуване явище описується як термопружно-пластична рівновага ізотропної матриці під дією прикладених до неї масових (гравітаційне поле Землі) та поверхневих зусиль, неоднорідного стаціонарного поля температури. Крім того, вважається, що модуль Юнга в кожній точці матриці залежить від температури та вологості.

Для визначення меж показників текучості та пластичності різних літологічних різновидів гірських порід використано емпіричні дані. Для визначення взаємозв'язку механічних та фізичних параметрів ґрунтів та з'ясування граничних меж фізичного стану порід проведено статистичну обробку та інтерполяцію отриманих даних. На основі цієї моделі побудовано численно-аналітичний алгоритм розв'язання задачі в математичній постановці та розрахунково-аналітичний модуль [23].

Висновки. Регіональне прогнозування зсувної небезпеки базується на поєднанні стохастичного та детермінованого підходів та має високу надійність отриманих результатів. Застосування стохастичних методик дозволяє вирішити завдання визначення та оцінки значення

комплексу факторів зсувоутворення, детерміноване моделювання зсувної небезпеки дає можливість виконати кількісну оцінку впливу окремих факторів на процес формування зсувів. Стохастичні та детерміновані методики взаємно доповнюють одна одну, а отримані результати є точними та адекватними. *Локальні прогнози* досліджують певні типи схилових процесів, визначають їх локалізацію та взаємодію із конкретними інженерними спорудами, вони оцінюють природу зсувного процесу, мають найбільше практичне значення і, як правило, здійснюються комплексом методів. Наведено прогнозно-еталонну модель оцінки зсувної небезпеки у межах Карпатського модельного полігону. Для визначення прогнозно-еталонних ознак зсувів, пріоритетності та інформативності факторів їх формування використано технології ГІС, що передбачали створення інформаційної бази концептуальної моделі регіону із сукупністю картографічних шарів і баз атрибутивної інформації, відповідною організації даних щодо можливих факторів виникнення сучасних екзогенних небезпечних геологічних процесів. Виконано порівняльний аналіз методів локального прогнозування зсувної небезпеки та підтверджено, що одним із важливих критеріїв оцінки стабільності схилу є напружено-деформований стан (НДС) породного масиву. Для зсувонебезпечних схилів із змінними параметрами водонасичення здійснено постановку задачі розрахунку НДС та визначено ступінь схематизації (формалізації) розрахунків. У рамках математичної моделі розглядуване явище описується як термопружно-пластична рівновага ізотропної матриці під дією прикладених до неї масових (гравітаційне поле Землі) та поверхневих зусиль.

Список використаних джерел

- Абуталиев Ф.Б., Петрухина И.А., Садыков Р.А., (1984). Моделирование инженерно-геологических процессов. Ташкент: Изд-во "Фан", 137 с.
- Abutaliev F.B., Petruhina I.A., Sadykov R.A., (1984). Modelirovanie inzhenerno-geologicheskikh processov. Tashkent, Fan, 137 p (In Russian).
- Барничка В.Ю., (1986). Отчет по региональному и стационарному изучению ЭГП на территории Закарпатской области УССР за 1982-1986 гг., Т. 1, 152 с.
- Barnichka V.Yu., (1986). Otchet po regional'nomu i stacionarnomu izucheniyu JeGP na territorii Zakarpatskoy oblasti USSR za 1982-1986, Vol. 1, 152 p (In Russian).
- Дослідження зсувних процесів геофізичними методами / Е.Д. Кузьменко, А.Ф. Безсмертий, О.П. Вдовина та ін.; за ред. Е.Д. Кузьменка, (2009). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 294 с.
- Kuz'menko E.D., Bezsmertyy A.F., Vdovyna O.P. et al., (2009). Doslidzhennya zsuivnykh protsesiv heofizychnymy metodamy. Ed. E.D. Kuz'menko. Ivano-Frankivsk, IFNTUNH, 294 p (In Ukrainian).
- Закономірний зв'язок між величинами імовірностей виникнення зсувів та зсувної небезпеки при комплексному впливі природно-техногенних факторів (теоретичні засади та система прогнозування) / Кузьменко Е.Д., Крижанівський Є.І., Карпенко О.М., Журавель О.М., (2007). Екологічні проблеми нафтогазового комплексу: міжнар. наук.-практ. конф., 26 лютого-2 берез. 2007 р.: матеріали конф. К.: НПЦ "Екологія, наука, техніка", 71-74.
- Kuz'menko E.D., Kryzhanivskyy Ye.I., Karpenko O.M., Zhuravel' O.M., (2007). Zakonomirnyy sv'yazok mizh velichynamy imovirnostey vynyknennya zsuiviv ta zsuivnoyi nebezpeky pry kompleksnomu vplyvi prirodo-tekhnogennykh faktoriv (teoretychni zasady ta sistema prognovuвання) / Кузьменко Е.Д., Крижанівський Є.І., Карпенко О.М., Журавель О.М., (2007). Ekologichni problemy naftogazovoho kompleksu: mizhnar. nauk.-prakt. konf., 26 Febr.-2 March 2007: abstracts. Kyiv, NPTs "Ekolohiya, nauka, tekhnika", 71-74 (In Ukrainian).
- Інженерний захист та освоєння територій: Довідник / А.І. Білеуш, С.П. Дудник, Г.А. Заблоцький та ін., (2000). К.: Основа, 344 с.
- Bileush A.I., Dudnyk S.P., Zablots'kyi H.A. et al., (2000). Inzhenernyy zakhyst ta osvoyennya terytoryi. Dovidnyk. Kyiv, Osнова, 344 p (In Ukrainian).
- Іванов И.П., Хромых Д.П., (1991). Моделирование в инженерной геодинамике. Л.: Изд-во ЛГИ, 98 с.
- Ivanov I.P., Khromykh D.P., (1991). Modelirovanie v inzhenernoj geodinamike. L., Izd-vo LGI, 98 p (In Russian).
- Інженерна геодинаміка України і Молдови (оползневые геосистеми): в 2 т. / под ред. Г.И. Рудько, В.А. Осюка, (2012). Черновцы: Букрек, Т. 1, 742 с., Т. 2, 744 с.
- Inzhenernaya geodinamika Ukrainy i Moldovy (opolznevyye geosistemy): Ed. G.I. Rud'ko, V.A. Osijuk, (2012). Chernovtsy, Bukrek, Vol. 1, 742 p., Vol. 2, 744 p (In Russian).
- Кузьменко Э.Д., (2007). Универсальный алгоритм прогнозирования экзогенных геологических процессов. Мониторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища: VIII міжнар. наук. конф., 20-23 верес. 2007 р.: матеріали конф. К., 16-17.
- Kuz'menko E.D., (2007). Universal'nyy algoritm prognizirovaniya jekzogennykh geologicheskikh processov. Monitorynh nebezpechnykh

heolohichnykh protsesiv ta ekolohichnoho stanu seredovyschcha: VIII mizhnar. nauk. konf., 20-23 Sept. 2007: abstracts. Kyiv, 16-17 (In Russian).

9. Максимов С.Н., (1978). Изучение напряженного состояния на моделях из упругих материалов для оценки устойчивости оползневых склонов. Вопросы инженерной геологии и грунтоведения, М.: Изд-во МГУ, 4, 109-115;

Maksimov S.N., (1978). Izuchenie napryazhennogo sostoyaniya na modelyakh iz uprugih materialov dlya ocenki ustoychivosti opolznevyykh sklonov. Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya, Moscow, 4, 109-115 (In Russian);

10. Максимов С.Н., Шарий А.А., (1970). К вопросу выбора масштаба моделирования при изучении напряженного состояния пород склонов. Вопросы формирования и устойчивости высоких склонов, М.: Изд-во МГУ, 105-111.

Maksimov S.N., Shariy A.A., (1970). K voprosu vybora masshtaba modelirovaniya pri izuchenii napryazhennogo sostoyaniya porod sklonov. Voprosy formirovaniya i ustoychivosti vysokikh sklonov, Moscow, 105-111 (In Russian).

11. Моделирование в геомеханике / Ф.П. Глушihin, Г.Н. Кузнецов, М.Ф. Шклярский и др., (1991). М.: Недра, 240 с.

Glushihin F.P., Kuznetsov G.N., Shklyarskiy M.F. et al., (1991). Modelirovaniye v geometicheskoy mekhanike. Moscow, Nedra, 240 p (In Russian).

12. Моніторинг зсувних процесів на трасах газопроводів / Кузьменко Е.Д., Журавель О.М., Рудко В.П. та ін., (2009). Нафтова і газова промисловість, 55-57.

Kuz'menko E.D., Zhuravel' O.M., Rudko V.P. et al., (2009). Monitoryng zsvnykh protsesiv na trasakh hazoprovodiv. Naftova i hazova promyslovist', 55-57 (In Ukrainian).

13. Опыт оценки устойчивости склонов сложного геологического строения методом конечных элементов и экспериментами на моделях / Золотарев Г.С., Ухов С.Б., Семенов В.В. и др.; под ред. Г.С. Золотарева, (1973). М.: Изд-во МГУ, 277 с.

Zolotarev G.S., Uhov S.B., Semenov V.V. et al., (1973). Opyt ocenki ustoychivosti sklonov slozhnogo geologicheskogo stroeniya metodom konechnykh elementov i eksperimentami na modelyakh. Ed. G.S. Zolotarev. Moscow, Izd-vo MGU, 277 p (In Russian).

14. Пендин В.В., (1994). Изоморфизм и изомерность инженерно-геологических условий. Геология, 1, 44-48.

Pendin V.V., (1994). Izomorfizm i izomernost' inzhenerno-geologicheskikh usloviy. Geokologiya, 1, 44-48 (In Russian).

15. Прогноз розвитку зсувних процесів як фактор забезпечення надійної експлуатації трубопроводів / Е.Д. Кузьменко, С.І. Крижанівський, О.М.Карпенко та ін., (2005). Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 4(17), 24-35.

Kuz'menko E.D., Kryzhanivskyy Ye.I., Karpenko O.M. et al., (2005). Prohnoz rozvytku zsvnykh protsesiv yak faktor zabezpechennya nadiynoyi ekspluatatsiyi truboprovodiv. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch, 4(17), 24-35 (In Ukrainian).

16. Фізичне моделювання електромагнітних полів у геологічному середовищі / Кобзова В.М., Дешиця С.А., Ладанівський Б.Т., Мороз І.П., (2008). К.: Наукова думка, 167 с.

Kobzova V.M., Deshytsya S.A., Ladanivskyy B.T., Moroz I.P., (2008). Fizychnye modelyuvannya edektromagnitnykh poliv u heolohichnomu seredovyschi. Kyiv, Naukova dumka, 167 p (In Ukrainian).

17. Фоменко И.К., (2012). Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов. Инженерная геология, 6, 44-53.

Fomenko I.K., (2012). Sovremennyye tendencii v raschetakh ustoychivosti sklonov. Inzhenernaya geologiya, 6, 44-53 (In Russian).

18. Cees J. Van Westen, (2000). The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. Surveys in Geophysics, 21, 2-3, 241-255.

19. Foster C., Gibson A., Wildman G., (2008). The new national Landslide Database and Landslide Hazard Assessment of Great Britain. First World Landslide Forum (Tokyo, Japan, 18-21 Nov. 2008): papers, <http://nora.nerc.ac.uk/4694/>.

20. Garsia_Rodriguez M.J., Malpica J.A., Benito B., Diaz M., (2008). Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. Geomorphology, 95, 172-191.

21. Gershenfield N., (1999). The nature of Mathematical Modeling. Cambridge, 344 p.

22. Gorsevski P.V., Gessler P.E., Foltz R.B., Elliot W.J., (2006). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. Transaction in GIS, 10, 395-415.

23. Ivanik O., Lavrenyuk M., Shevchuk V., (2009). Numerical modeling of geological environment impact on the pipelines. Earthdoc, <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=23664>.

24. Kamp U., Growley B.J., Khattak Gh.A. et al., (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. Geomorphology, 101, 4, 631-642.

25. Pan X., Nakamura H., Nozaki T. et al., (2008). A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis. Journal of the Japan Landslide Society, 45, 3, 187-195.

26. Pelletier J., (2008). Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge, 295 p.

27. Saha K., Arora M.K., Gupta R.P. et al., (2005). GIS-based route planning in landslide-prone areas. International Journal of Geographical Information Science, 19, 10, 1149-1175.

Надійшла доредколегії 20.10.14

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Head of Department
Institute of Geology
Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine
E-mail: om.ivanik@gmail.com

METHODOLOGY OF PREDICTING LANDSLIDE HAZARDS ON A REGIONAL AND LOCAL SCALE: PRINCIPLES AND MODELS

Assessment of geohazard risks in some areas within man-made systems should be based on an integrated analysis of qualitative and, primarily, quantitative data on the geology and geomorphology of the territory and the corresponding causative physiographic factors. The main objective of this paper is to provide the scientific background to locating areas prone to geohazards and modeling their impacts on systems of natural and man-made origin. The methods of deterministic modeling and prediction are used for the purpose. We have analyzed the world experience in regional and local landslide hazards prediction based on the integrated approach. Regional landslide hazard prediction involving stochastic and deterministic approaches yields highly reliable results. Local predictions are a valuable research tool used in order to explore the nature of landslides and to identify their location and interaction with engineering facilities. A forecast-reference model for landslide hazards assessment within the Carpathian polygon has been developed. GIS-analysis has been used to determine the forecast-standard features of landslides, major indicators and triggering factors. The analysis has provided a database for developing a conceptual model of the region with a set of map layers and attributes. There has been carried out a comparative analysis of methods used for predicting local landslide hazards. The stress-strain state of the rock mass has been proved to be one of the most important criteria for evaluating the slope stability. A strategy has been developed for stress-strain assessment and formalization of the calculations for landslide slopes with variable parameters of water saturation.

Key words: landslide hazard, prediction, GIS, stress-strain state.

Е. Іванік, д-р геол. наук, доц.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна
E-mail: om.ivanik@gmail.com

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ, МОДЕЛИ

Определение приоритетности факторов возникновения опасных процессов на отдельных участках функционирования техногенных систем должно осуществляться посредством интегрированного анализа качественных и в большей мере количественных данных по геолого-геоморфологическому строению территории и физико-географических условий формирования этих явлений. Главная цель при этом – обоснованное выделение локальных участков возможного формирования опасных геологических процессов и моделирование их влияния на функционирование природно-техногенных систем, для которых применяются методы детерминированного моделирования и прогноза. Проведен анализ отечественного и зарубежного опыта при выполнении регионального и локального прогнозирования оползневой опасности на основе комплексного подхода. Региональные прогнозы базируются на объединении стохастического и детерминированного подходов и характеризуются высокой надежностью полученных результатов. На основе локальных прогнозов исследуется природа оползневых процессов, определяется их локализация и взаимодействие с инженерными сооружениями. Приведена прогноз-эталонная модель оценки оползневой опасности в пределах Карпатского модельного полигона. Для определения прогноз-эталонных признаков оползней, приоритетности и информативности факторов их формирования использованы ГИС-технологии, предусматривающие создание информационной базы концептуальной модели региона с совокупностью картографических слоев и баз атрибутивной информации. Проведен сравнительный анализ методов локального прогнозирования оползневой опасности. Подтверждено, что одним из важнейших критериев оценки стабильности склона является напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива. Для оползнеопасных склонов со сменными параметрами водонасыщения осуществлена постановка задачи расчета НДС и определена степень схематизации (формализации) расчетов.

Ключевые слова: оползневая опасность, прогноз, геоинформационные системы, напряженно-деформированное состояние.