

**О.М. Трофимчук, Ю.І. Калюх, Г.С. Глебчук**

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ

## **ПРАКТИЧНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ І ПРОГНОЗУ ЗМІНИ СКЛАДНИХ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ТА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**



*Описані теоретико-методичне обґрунтування розробки автоматизованого робочого місця та практичне відпрацювання програмного комплексу LANDSLIP7.0 з розрахунку зсувонебезпечних схилів, можливість його застосування в складних інженерно-геологічних і сейсмічних умовах України.*

*Ключові слова: програмний комплекс, напружено-деформований стан, зсув, інтерфейс.*

За даними Національних доповідей Міністерства надзвичайних ситуацій та НАН України на території України протягом останніх років спостерігається тенденція щодо подальшої активізації зсувних процесів майже в усіх адміністративних областях, за винятком Волинської та Рівненської. Особливої активності зсувних процесів зазнали Карпатський регіон, узбережжя Чорного та Азовського морів, правобережжя Дніпра та його правих приток, долина Сіверського Дінцю та ін. Загалом на території України виявлено близько 23 тис. зсувів.

Підвищений інтерес до розв'язання задач зсувної небезпеки та побудова відповідних математичних моделей, які адекватно описують ці негативні деформаційні процеси в геологічному середовищі внаслідок зміни стану природно-геологічних та техногенних чинників, а також розробка відповідних алгоритмів викликані гострою потребою при оптимальному вирішенні питань використання земельних ділянок зі складним рельєфом і гідрологією та збереження навколишнього природного середовища.

Застосування комплексу заходів, спрямованих на запобігання розвитку зсувних процесів, неможливе без створення відповідних математичних моделей із використанням сучасних обчислювальних систем на базі комп'ютерної техніки. Як об'єкти математичного моделювання зсувні процеси описуються системами нелінійних рівнянь. На сьогодні чисельне моделювання нелінійних систем існує як окрема математична галузь науки. Серед робіт, присвячених побудові складних математичних моделей процесів гідродинаміки, механіки деформованого середовища, фільтрації підземних вод, слід виділити праці українських вчених *Ляшка І.І., Сергієнка І.В., Дейнеки В.С., Скопецького В.В., Ляшенка І.М., Власюка А.П.* та ін.

Серед методів визначення зсувної небезпеки провідне місце займають методи оцінки стійкості схилів. Питаннями по удосконаленню методів розрахунку зсувної небезпеки та заходів по стабілізації зсувонебезпечних територій займалися такі вчені: *Маслов М.М., Шахуняни Г.М., Гольдштейн М.Н., Гінзбург Л.К., Бойко І.П., Школа О.В., Зоценко М.Л., Демчишин М.Г., Бішоп Ф.В., Терцагі К. та ін.*

При спробі математичного моделювання зсувів виникає цілий комплекс проблем, які пов'язані із недостатньою розробленістю методів оцінки ступеня зсувної небезпеки та недосконалістю розрахунків протизсувних споруд. Серед основних недоліків можна виділити відсутність методології системного підходу щодо аналізу в межах одного програмного комплексу зсувної небезпеки як окремо взятого схилу, так і зсувонебезпечних територій.

Що стосується моделювання окремих зсувів, то на сьогодні немає сучасних автоматизованих робочих комплексів на основі «візуального програмування» по обчисленню зсувів. У математичних моделях, що описують зсувний схил, зазвичай враховуються лише фізико-механічні властивості ґрунту і не враховується вплив напірних вод, водонасиченості ґрунтів (поровонасичених систем), сейсмічної сили, наявності будівель та споруд.

Метою інноваційного проекту «Практичне відпрацювання методики оцінки та прогнозу зміни складних гідрогеологічних та інженерно-геологічних процесів» є розробка автоматизованого робочого місця спрощеного інтерфейсу у вигляді програмного комплексу з розрахунку зсувонебезпечних схилів для спеціалістів інженерно-технічних служб районних та міських держадміністрацій.

Основні завдання проекту:

- ✦ аналіз сучасного стану математичних моделей, прикладних методів, програмних засобів математичного та комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) схилів в складних інженерно-геологічних і сейсмічних умовах України;
- ✦ теоретико-методологічне обґрунтування математичних моделей та чисельних методів моделювання літодинамічних процесів земної поверхні;
- ✦ розроблення блок-схеми, алгоритмів, прикладної методики програмного комплексу оцінки стану зсувонебезпечних схилів, програмування та тестування на відомих окремих теоретичних розрахунках та практичних прикладах;

- ✦ відпрацювання ефективних процедур та спрощеного людино-орієнтованого інтерфейсу програмного комплексу з подальшою можливістю застосування (використання) спеціалістами інженерно-технічних служб районних та міських держадміністрацій, які мають переважно будівельну фахову підготовку без спеціальної комп'ютерної освіти;
- ✦ підготовка відповідної документації для користувачів автоматизованого робочого місця. Нижче наведено короткий опис результатів проекту.

### **АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НДС СХИЛІВ**

Переважна частина історичних та архітектурних пам'яток багатьох міст України знаходиться на зсувонебезпечних територіях. Зокрема, в місті Києві вздовж схилів Дніпра перепад висот складає понад 100 м, в абсолютних позначках — це 87,11–198,00 м. Можна спостерігати численні зсувні процеси — від Андріївської Церкви до Києво-Печерської Лаври включно. Основним фактором, який визначив сучасний рельєф території м. Києва, є льодовикова діяльність. Це зумовило відсутність твердих порід (за винятком невеликої товщі пісковику) відсутні, а такі ґрунти, як лес, піски, суглинки та глини легко розмиваються. Часте чергування водопроникних та водонепроникних шарів призвело до утворення кількох водонесених горизонтів, що при наявності значного перепаду висот і стрімких схилів, приводить до поширення зсувних процесів.

На сьогоднішній день існує багато класифікацій зсувів, їх типи досить різноманітні. Класифікаціями зсувів займався багато вчених. А.П. Павлов (1903 р.) класифікував зсуви за характером розвитку зміщень: *деляпсивні* і *детрузивні*; Ф.П. Саваренський (1934) виділив зсуви щодо положення поверхні зміщення: *асеквентні*, *консеквентні*, *інсеквентні*, але особливості оцінки їх стійкості не було показано; М.М. Маслов вказує на такі форми порушення

стійкості і деформації схилів: обвал, зрушення із зрізом і обертанням, сколювання при просіданні, ковзання, зсув-зрушення, сповзання, сплив, пластична деформація, вікова переробка схилу і подає для кожного відповідний метод розрахунку стійкості та види протизсувних заходів; К. Терцагі запропонував розрізняти два типи руху земляних мас: сповзання і зсув, які за своєю природою подібні.

З метою визначення НДС зсувонебезпечних схилів та розробки ефективних протизсувних заходів на практиці у більшості випадків використовують інженерні методи. Застосування емпіричних формул для розрахунку стійкості схилів набуло широкого розповсюдження. Характерним при застосуванні емпіричних формул є визначення стану, в якому перебуває схил: стійкий (дограничний), граничний чи нестійкий (позаграничний).

До цього ряду відносяться методи, розроблені В. Фелленіусом (1936), А. Бішопом (1955), Н. Янбу (1954, 1973), М. Моргенстерном та В. Прайсом (1965), Е. Спенсером (1967), Д. Тейлором, В.В. Соколовським, М. Масловим і Р. Беррером (1949), Г.М. Шахунянцем, Р.Р. Чугаєвим та ін.

Моделі лінійно-деформованого середовища — найбільш поширені в інженерній практиці класичної механіки ґрунтів. У цих моделях при навантаженні крім разового завантаження ґрунту і лінійної залежності між напруженнями та деформаціями розглядається ще й загальна деформація без поділу на пружну й пластичну складові. Перше припущення забезпечує можливість використання для розрахунків напружень у масиві ґрунту апарату теорії пружності, а друге — при відомих напруженнях визначення кінцевих деформацій основи.

При розрахунках коефіцієнтів стійкості у площинному перетині по профілях, які проходять через об'єкт проектування, користуються найбільш відомими та широко розповсюдженими на практиці розрахунковими методами Маслова–Беррера і Шахунянца. Як і більшість розрахункових методів, вони базуються на застосуванні теорії граничного напруженого ста-

ну сипучого середовища, що використовується як математична модель зв'язних і сипучих ґрунтів та тріщинуватих скелястих гірських порід. Незважаючи на суттєві припущення, широкомасштабне застосування розрахункових коефіцієнтів стійкості та величини зсувного тиску підтвердило, що вони достатньо задовільно описують реальний стан зсувних масивів. Відхилення результатів обчислень від дійсних (натурних) обумовлені не стільки недосконалістю методів розрахунків, скільки недосконалістю визначення показників міцності ґрунтових масивів, що використовуються в даних обчисленнях, а також у ряді випадків — не зовсім вірним (правильним), що відповідає натурному, просторовим положенням прийнятих до розгляду поверхонь ковзання, за якими виконують дані розрахунки.

#### ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЛІТОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Зазвичай показники міцності ґрунтів, що приймаються в розрахунках, визначаються шляхом лабораторних випробовувань зразків. Однак час навантажень в цих випробуваннях вимірюється у хвилинах, що є непорівнюваним із часом навантажень зсувних масивів, що відбувається протягом десятиліть. Один із можливих методів усунення цієї невідповідності належить М.М. Маслову [1]. За його методикою абсолютна величина опору ґрунту зрушенню (у статистиці сипучого середовища) описується виразом, який дещо відрізняється від прийнятого у теорії граничного напруженого стану сипучого середовища [2]:

$$|\tau| = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C_w + C_c,$$

де  $\sigma_n$  — компонента нормальних напруг;  $\varphi$  — кут внутрішнього тертя;  $C_w$  — водно-колоїдна зв'язність (зчеплення), яка суттєво залежить від вологості та знижується в результаті тривалого навантаження;  $C_c$  — жорстке структурне зчеплення з властивістю незворотних зв'язків.

Повзучість, викликана головним чином зміною  $C_w$ , суттєво проявляється, коли напруги зсуву, діючі у ґрунтовому масиві, знаходяться в межах [3]

$$\sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C_c < |\tau| < \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C_w + C_c.$$

При навантаженні в цих межах стійкість ґрунтового масиву забезпечується тільки протягом короткого періоду, порівняного з часом навантаження при лабораторних випробуваннях на міцність. Далі відбувається зменшення величини зчеплення, яке може призвести до порушення умов стійкості ґрунтового укосу.

Методи визначення реологічних властивостей ґрунту розроблені. При випробуваннях глиняних ґрунтів застосовують порівняння показників зрушень при випробуваннях зразка зі зрушеннями при тривалому навантаженні по штучно підготовленій поверхні ковзання. При використанні таких порівнянь і методики Маслова може бути визначена швидкість переміщення маси порід, що повільно стискаються протягом досить тривалого часу, і деформація зміщення підпорних протизсувних споруд. Проте вищезгадані, як і інші методи реологічних випробувань, поки що мало застосовують на практиці.

Розгляд умов зсувонебезпечних схилів та застосування розрахунків зсуву при проектно-пошукових роботах показали, що рівняння нашої математичної моделі, розробленої на основі узагальнень теоретичних підходів статички сипучого середовища, та найбільш відомих і розповсюджених на практиці методів обчислень є достатньо надійним способом опису зсувних процесів у їх різних проявах і стану схилів у момент, передуючий їх переходу в стан граничної рівноваги.

Використання рівнянь моделі дозволило розробити принципи та варіанти розв'язання на практиці важливої задачі дослідження — визначення положення поверхні ковзання на варіаційній основі та вирішення інших поставлених нами задач.

Практична перевірка розрахункових формул, прийнятих у математичній моделі, показала, що

вони дають достатньо задовільну збіжність розрахованих результатів із даними вимірювань. На практиці розбіжності не перевищували 15 % (а у окремих випадках — до 30 %) і при цьому вкладалися у запас стійкості.

### ПРИКЛАДНА МЕТОДИКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ LANDSLIP7.0 ОЦІНКИ НДС ЗСУВНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ. ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ

Для візуального проектування досліджуваного зсувного процесу й відображення його змін у часі використано графічний редактор. Для розрахунків показників зсувного процесу нами було обґрунтоване використання методів Маслова—Беррера й Шахунянца. Створення для кожного з цих методів окремого додатку програми недоцільне, оскільки для кожного з завдань потрібен свій графічний редактор, що призведе до значного збільшення працевитрат. Тому слід вибрати засіб для розробки, який вирішив би поставлену задачу у найкоротший час та з максимальною зручністю.

Таку можливість надає так званий *об'єктно-орієнтований підхід*, коли програма розбивається на складові компоненти, опрацьовуються їх взаємозв'язки, а потім здійснюється реалізація власне програми. Були застосовані принципи об'єктно-орієнтованого програмування. Його методологія ґрунтується на представленні програми як сукупності об'єктів, кожний з яких є реалізацією певного класу, а класи включають ієрархію на принципах успадкування. Програму розбивають на функціонально закінчені фрагменти — об'єкти, кожен з яких належить до певного класу, що включає повний опис об'єкта і його внутрішньої структури. Крім того, об'єктно-орієнтоване програмування включає також основні принципи: успадкування, інкапсуляцію й поліморфізм, котрі реалізовані в запропонованій нами програмі Landslip7.0.

Однією із найважливіших задач, яка виникає перед початком розробки програми, є вибір мови та середовища програмування. Для реалізації поставленої задачі априорі були роз-

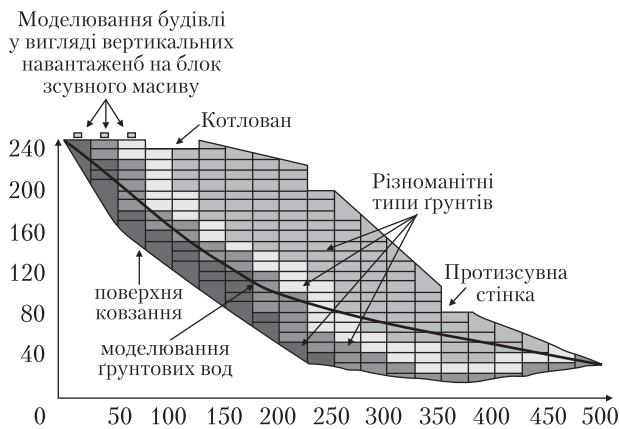


Рис. 1. Геометрична модель зсувного масиву

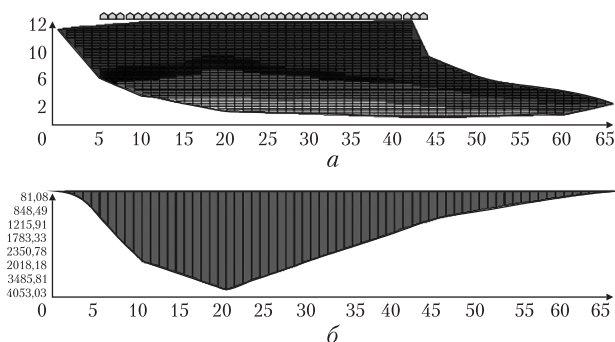


Рис. 2. Поверхня ковзання: *a* – розрахункова модель зсуву за програмою Landslip7.0 з моделюванням будівлі у випадку повного водонасичення ґрунту; *b* – зсувний тиск

глянуті мови C, C++ та Java. З'ясувалося, що технологія Java із запропонованих є найбільш сучасною платформою розробки та впровадження додатків у індустрії. Програмне забезпечення для платформи Java працює під керуванням усіх основних операційних систем для підприємств і клієнтських місць, у тому числі операційної системи Solaris, Linux, AIX, OS/390, HP-UX, Windows и Macintosh, а також на таких клієнтських пристроях, як мобільні телефони та кишенькові міні-комп'ютери (PDA).

Програма Landslip7.0, призначена для зсувних розрахунків – визначення коефіцієнта стійкості методами Маслова–Беррера чи Шахунянца й величини зсувного тиску методом Шахунянца, а також проведення ітераційного

підбору параметрів зсувного масиву – показників міцності за заданим коефіцієнтом стійкості й оптимального просторового положення поверхні ковзання.

Розглянемо принцип роботи з програмою через графічний редактор – інтерфейс GUI (Graphics User Interface). З іншими об'єктами програми виконавець під час роботи не стикається, керування ними здійснюється через графічний редактор, що їх утворює, модифікує, використовує й потім по потребі видаляє.

Файл даних зсувного масиву містить дані про його структуру. У командному рядку можна розмістити відразу кілька файлів з даними про зсуви і працювати з ними одночасно в різних вікнах. За умови відсутності даних вікно буде порожнє.

У процесі роботи з реальним зсувним масивом графічний редактор зберігає поточне положення курсору щодо координатної сітки зсуву. У нижньому рядку відображаються висота й ширина зсуву в метрах (поточний масштаб). Масштаб задається графічним редактором для зручності відображення структури зсуву зі зміною обох координат. Він може бути змінений виконавцем. З даними про розміри зсуву по горизонталі й вертикалі він жорстко не пов'язаний і це ніяк не відображається на результатах обчислень. Якщо зображення зсуву не може бути повністю показане у вікні, то програма показує його частину, а все зображення прокручується за рахунок натискання повзунків.

Взаємодіючи з графічним редактором, виконавець описує структуру зсуву, здійснює маніпуляцію з додатковими поверхнями ковзання й лінією ґрунтових вод. За його командами графічний редактор, що є сполучною ланкою між користувачем і об'єктами програми, які описують структуру зсуву й виконують математичні обчислення, створює, модифікує й видаляє ці об'єкти.

Через меню програми здійснюються функції – завантаження, збереження даних у зовнішньому файлі, друкування, збереження гра-

фічного образу робочої області й завершення роботи програми по даному зсуву, а також функції редагування геометрії зсуву, введення поверхні ґрунтових вод і додаткових поверхо-хонь ковзання. За командою опції вмикаються функції керування роботою програми й параметри, що використовуються під час проведення математичних обчислень. У процесі роботи з декількома зсувами кожен відображається у своєму вікні, яке містить інформацію про нього та його графічне зображення.

В основу програмного комплексу Landslip7.0 покладено визначення зсувного тиску й коефіцієнту стійкості для різних властивостей ґрунту, сейсмічних та гідрогеологічних умов, оцінки надійності протизсувних споруд, що дає можливість передбачувати та прогнозувати виникнення загрозливих ситуацій, розробки відповідних рекомендації щодо подальшої експлуатації «проблемних» схилів [4–7].

За допомогою програми Landslip7.0 стає можливим виконання чисельного моделювання НДС схилу за таких умов (рис. 1): підвищення рівня ґрунтових вод; збільшення сейсмічності ділянки будівництва; спільний вплив сейсміки і води; наявність будівлі (будівель), облаштування котловану та протизсувних стінок.

Як приклад застосування програми Landslip7.0 з математичного моделювання стійкості схилів можна навести будівництво житлового будинку у Держинському районі м. Харкова (вул. Фронтова, 3). Головною метою розрахунків є оцінка загальної та локальної стійкостей схилу (у тому числі з урахуванням прийнятих основних конструктивних рішень щодо спорудження 10–16-ти поверхового житлового будинку). У кожному варіанті для кожної поверхні ковзання були наведені розрахункова схема за програмою Landslip7.0 та графік зсувного тиску (рис. 2).

## ВИСНОВКИ

1. Зсувні процеси — це одне із небезпечних екзогенних явищ. Вони відбуваються майже на всій території України і залежать від групи

факторів, що зумовлюють стійкість ґрунтового масиву, а тому потребують детального дослідження умов активізації руху ґрунтових мас, а також завчасного раціонального інженерного захисту зсувонебезпечних ділянок.

2. Створення математичної моделі зсувного процесу на підставі узагальнення відомих теоретичних положень статички сипучого середовища й поширених на практиці методів розрахунку коефіцієнта стійкості й величини зсувного тиску дозволило створити теоретичну базу для розробки комп'ютерної програми розрахунків показників зсувної небезпеки на варіаційній основі.

3. Розроблено й реалізовано автоматизований робочий комплекс із графічним інтерфейсом GUI, чисельними алгоритмами, написано й налагоджено у цілому програму Landslip7.0 мовою програмування Java. Комплекс дає змогу для досить великої кількості варіантів здійснювати автоматизоване й оперативне обчислення різних характеристик зсувного процесу, які будуть використовуватися надалі для визначення ступеня зсувної небезпеки; як початкові дані для проектування споруд інженерного захисту територій і об'єктів; для оцінки ефективності й аудиту вже побудованих протизсувних споруд (підпірних стінок та ін.). Вірогідність результатів програмного комплексу Landslip7.0 підтверджується перевіркою розрахункових формул, прийнятих у математичній моделі, порівняльним тестуванням результатів, наявних у науковій літературі для окремих випадків та порівнянням з результатами окремих натурних експериментів.

4. Програмний комплекс Landslip7.0 найбільш повно відповідає потребам проектувальників та інженерів-будівельників при територіальній оцінці зсувонебезпечності і може бути використаний проектно-дослідними організаціями, Міністерством надзвичайних ситуацій, а також місцевими органами влади при вирішенні питань відносно забудови зсувонебезпечних схилів та складанні відповідних прогнозів.

5. Результаты досліджень, як методика розрахунку зсувонебезпечних схилів, були впроваджені в ТОВ «МІЛУСА» та в Київській міській державній адміністрації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маслов Н.Н. Прикладная механика грунтов / Н.Н. Маслов. — М.: Изд. министерства строительства предприятий машиностроения, 1949 г. — 328 с.
2. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. — М.: Гостехтеориздат, 1954. — 276 с.
3. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. — М.: Стройиздат, 1979. — 80 с.
4. Трофимчук А.Н., Калюх Ю.И., Глебчук А.С. Математическое моделирование устойчивости оползневого склона при подъеме уровня грунтовых вод // Экология і ресурси. — 2008. — № 18. — С. 51–58.
5. Трофимчук А.Н., Глебчук А.С., Полевецкий В.В. Об устойчивости склонов при изменении сейсмических условий // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). — 2008. — Вип. 69. — С. 304–311.
6. Трофимчук А.Н., Глебчук А.С., Калюх Ю.И. Математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния оползневого массива при наличии здания и обустройстве котлована в условиях подтопления // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). — 2008. — Кн. 1. — Вип. 71. — С. 95–104.
7. Трофимчук А.Н., Глебчук А.С., Калюх Ю.И., Калюх Т.Ю. Математическое моделирование обратных задач в литодинамике оползней с учетом сейсмического фактора // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). — 2010. — Вип. 73. — С. 389–400.

А.Н. Трофимчук, Ю.И. Калюх, А.С. Глебчук

ПРАКТИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ  
ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ИЗМЕНЕНИЙ СЛОЖНЫХ  
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Описаны теоретико-методическое обоснование разработки автоматизированного рабочего места и практическая отработка программного комплекса LANDSLIP7.0 по расчету оползнеопасных склонов, возможность его применения в сложных инженерно-геологических и сейсмических условиях Украины.

*Ключевые слова:* программный комплекс, напряженно-деформированное состояние, оползень, интерфейс.

О. Трофимчук, Ю. Калюх, А. Глебчук

PRACTICAL WORKING OF METHODOLOGY  
FOR ASSESSMENT AND PROGNOSTICATION  
OF CHANGES IN COMPLEX HYDROGEOLOGICAL  
AND ENGINEER-GEOLOGICAL PROCESSES

The theoretical and methodological fundamentals for the development of workstation and practical working of LANDSLIP7.0 software complex for calculating landslide-hazardous slopes, possibility of its application in complex engineer-geological and seismic conditions of Ukraine are described.

*Key words:* program complex, tensely-deformed state, landslide, interface.

Стаття надійшла до редакції 27.07.11