

УДК 55(091); 55(092)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.04>

О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник,
E-mail: menshov.o@ukr.net
Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
К. Бондар, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
К. Гадяцька, канд. геол. наук, інж.,
Л. Тустановська, канд. геол. наук, доц.,
Р. Хоменко, канд. геол. наук, асист.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ В МЕЖАХ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ ЛИСА ГОРА, КИЇВ)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.В. Шабатурою)

Розглянуто комплексування геолого-геофізичних та ГІС-методів для оцінки небезпечних геологічних процесів у межах урбанізованого середовища. Принциповим пробілом у вивченні геологічно небезпечних (зсуви, ерозія, забруднення і т. ін.) територій України є відсутність інформації про стан гірських порід та ґрунтів, а також їхньої взаємодії з минулими та сучасними природними та антропогенними утвореннями. Об'єктом дослідження є територія зсувної активізації Лисої гори, Україна, яка розташована в Голосіївському районі Києва. Незважаючи на умовну стабілізацію схилу, зсуви становлять реальну загрозу функціонуванню об'єктів інфраструктури, зокрема деформації залізниці вздовж Столичного шосе. Отримано результати дослідження зсувонебезпечних ділянок. Запропоновано ефективну методику, що включає геолого-геофізичну, термографічну зйомку та дистанційне зондування для моніторингу зсувних процесів та їх локального прогнозування. Результати вимірювання методом електротомографії на Лисій горі виявили дві локальні зони активізації зсувних зсувів, які розташовуються в діапазоні глибин 3–8 м від поверхні землі. Випадковий розподіл магнітної сприйнятливості ґрунту та частотна залежність магнітної сприйнятливості в межах ландшафтних перетинів та за вертикаллю у ґрунтових генетичних горизонтах підтверджують наявність зсувів, перерозподілів та нововідкладень ґрунту та підстильних порід. Це пов'язано з ерозійними і зсувними процесами.

Ключові слова: зсувна небезпека, стійкість схилів, геоморфологія, електротомографія, магнітна сприйнятливість, ґрунт.

Вступ. Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки ризиків та катастроф природного характеру, яка незалежно від вибору тих чи інших підходів щодо її розв'язання вимагає всебічного поглибленого аналізу геолого-геоморфологічних та гідрометеорологічних чинників формування зсувів, а також синтезу наукових та фондових матеріалів для повного розуміння досліджуваної проблеми. Світовий досвід у сфері дослідження гравітаційних процесів показав значну ефективність застосування комплексного синергетичного підходу для моделювання при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів (Foster et al., 2012; Garsia Rodriguez et al., 2008). Методи моделювання та ГІС активно застосовуються для отримання оцінки ймовірного розвитку зсувів, створення моделей багатофакторної просторової оцінки та прогнозного картування.

В основі регіонального прогнозування лежить спеціальне районування території, яке може охарактеризувати характер поширення зсувів та умови їх формування. Локальне прогнозування передбачає проведення польових робіт із залученням комплексу геолого-геофізичних та дистанційних методів, моніторинг розвитку зсувного процесу та аналіз напружено-деформованого стану схилу. Особливо важливим це є для урбанізованих територій, у межах яких використовуються спеціальні моніторингові дослідження.

Крім того, відповідно до завдань програми "Горизонт Європа" на локальному рівні важливим є застосування сучасних ефективних, швидкісних та дешевих технологій. Таким критеріям повністю відповідають магнітні методи дослідження ґрунтового покриву, які пов'язують розвиток ерозійних схлипових процесів із небезпекою подальшого виникнення зсувів.

Стан проблеми та постановка завдання. В основі регіонального прогнозування лежить спеціальне районування

території, яке може охарактеризувати специфіку поширення зсувів та умови їх формування. ґрунтуються такі прогнози на застосуванні як детермінованих, так і стохастичних методик, що мають високу достовірність отриманих результатів та можуть бути як якісними, так і кількісними. Якісний прогноз зсувонебезпеки включає методи, які ґрунтуються на експертних оцінках, та методи оцінки стійкості території в балах (Кузьменко та ін., 2009). Кількісний прогноз ґрунтується на стохастичному та детермінованому підходах (Pelletier, 2008). Методи детермінованого моделювання включають групу методів аналогій та методів оцінки прояву зсувних процесів. У такому випадку ГІС виступає не лише середовищем для введення, збереження даних та їх візуалізації, а й для проведення спеціальних розрахунків. До статистичних методів прогнозу зсувонебезпеки належать методи геодинімічного потенціалу, багатовимірної статистики та регресійного аналізу (Іванік, 2014).

Локальне прогнозування зсувів передбачає польові роботи, моніторинг і чисельне моделювання зсувних процесів із залученням комплексу геофізичних методів. Ці методи та спеціальні польові дослідження визначають склад і структуру найбільш небезпечних зсувів. Із цією метою також проводяться спеціальні аналітичні лабораторні дослідження з оцінкою фізичних параметрів гірських порід у межах зсувонебезпечних схилів, які використовуються під час оцінки стійкості схилу і розрахунків напружено-деформованого стану породних комплексів у зонах зсувної небезпеки на засадах теорії лінійної пружності (Іванік та ін., 2019).

В останні роки застосування геофізичних методів для локального прогнозування зсувів стало звичною практикою. Оглядова робота (Наск, 2000) аналізує фізичні основи застосування геофізичних методів при вивченні стабільності схилу. Автори (Whiteley et al., 2019) подають узагальнення досвіду щодо методологічних аспектів і

© Іванік О., Меньшов О., Кравченко Д., Бондар К., Гадяцька К., Тустановська Л., Хоменко Р., 2022

наголошують на впровадженні комплексних багатопараметричних і багатовимірних досліджень. Геофізичні методи є основою моніторингу зсувної небезпеки у забудованих і щільно заселених регіонах. Розвиток технології БЛА (Walter et al., 2009) та використання інших можливостей дистанційного зондування (Kirschbaum et al., 2015) збільшили часову і просторову розрізненість методів контролю деформацій поверхні і надали необхідне апіорне підґрунтя для постановки геофізичних досліджень. Переважна більшість їх виконується геоелектричними методами, а саме методами опору заземлень, а також самочинної поляризації (Hen-Jones et al., 2017).

В Україні геоелектричні дослідження зсувів проводяться давно (Vyzhva et al., 2020), настав час впровадження сучасних методів геофізичного моніторингу у цьому важливому сегменті природно-техногенної безпеки населення, а саме методу томографії електричного опору.

Розглядаючи ерозійні процеси ґрунтового покриву у контексті зсувної небезпеки територій, проаналізуємо сучасний стан магнітних досліджень у цій області. Відзначається (Ding et al., 2020), що багато районів зазнають впливу як вітрової, так і водної ерозії, що призводить до серйозної деградації земель. Магнітна сприйнятливість є ефективним інструментом для кількісного визначення перерозподілу ґрунтів як ознаки зсувної небезпеки. Існуючі методи вимірювання ерозії, як правило, включають закладання ґрунтових розрізів, 3D-лазерне сканування, моніторингові ерозієзнавчі спостереження та розробку привентивних заходів. На практиці такі процедури мають деякі обмеження. Результати дослідних робіт (Barbosa et al., 2019) мали на меті оцінку ефективності вимірювання магнітної сприйнятливості як індикатора факторів еродованості ґрунтів (для моделей USLE та WEPP) на прикладі оксизолів з різним вмістом заліза на північному сході штату Сан-Паулу, Бразилія. Ерозія, перерозподіл ґрунтів та накопичення відіграють важливу геоморфологічну та екологічну роль. Водну ерозію ґрунтового покриву, що спостерігається найбільш гостро у межах схилів, можна вважати частиною зсувних процесів верхньої частини геологічного розрізу. Під час ерозійних процесів відслонюються глибші ґрунтові генетичні горизонти, які можна ідентифікувати при вимірюванні набору магнітних параметрів, наприклад, найбільш експресного та дешевого для визначення параметра магнітної сприйнятливості. У той же час відзначається, що за допомогою зонування еродованих ділянок на основі вимірювання магнітної сприйнятливості можна робити прогностичні висновки про розвиток ерозії, що виникає у процесі обробки земель (Jordanova et al., 2016). Для виявлення ерозії ґрунтів слід вивчати вертикальні розподіли магнітних параметрів у ґрунтах з метою ідентифікації процесів змиву на поверхні (Kapicka et al., 2013). Крім того, магнітний метод успішно застосовується для ефективного та експресного визначення ерозії ґрунтів без залучення фізико-хімічних вартісних досліджень. Також магнітні методи застосовуються для моніторингу перерозподілу ґрунтів. Низка сучасних досліджень безпосередньо і нерозривно розглядає потенціал магнітних методів для одночасного виявлення ерозійних та зсувних процесів. У дослідженні (Eso et al., 2019) вивчали, як змінюються магнітні властивості та хімічний елементний склад у ґрунтового профілі на ділянці зсуву. У межах територій з інтенсивними кліматичними змінами для розробки превентивних заходів необхідна інформація про ерозію ґрунтів під час потужних опадів. Нові дані стосовно магнітних вишукувань у контексті вивчення ґрунтового покриву урбанізованих та ерозієнебезпечних

територій України наведені в роботах (Меньшов, 2016; Меньшов, 2018).

Матеріали і методи. В основі алгоритму щодо оцінки зсувонебезпеки лежить поетапне вивчення зсувних об'єктів із застосуванням комплексу методів. Однією з небезпечних ділянок активізації зсувів у межах м. Київ є Лиса гора (рис. 1), розташована в Голосіївському районі. В кінці 80-х років минулого століття Лиса гора набула статус природного парку, а залишки Лисогірської оборонної фортеці на її схилах є пам'яткою архітектури та об'єктом підвищеної уваги жителів та гостей столиці. Наразі досліджені зсувні схили в межах Лисої гори вважаються умовно стабілізованими завдяки виконанню протизсувних заходів у 2014 та 2016 роках. Необхідність дослідження обраної ділянки полягає в тому, що попри умовну стабілізацію схилу, зсуви становлять реальну загрозу функціонуванню інфраструктурних об'єктів, зокрема деформації залізничного полотна вздовж Столичного шосе. Зсув у межах Лисої гори (абсолютні відмітки – 156,6 м) є прикладом формування консеквентних зсувів, які розвиваються по строкатих глинах (N1-2sg) нижнього пліоцену та мають переважно циркоподібну форму. У складі горизонту строкатих глин (N1-2sg) нижнього пліоцену виділяється чотири товщі (дві верхні – темнішого забарвлення з домішками дисперсної вуглистої речовини, у складі яких переважає каолінит, та дві нижні – світлішого забарвлення, у складі яких окрім каоліниту зустрічається також монтморилоніт. У межах відслонення щільні та пластичні строкаті глини підлягають процесам вивітрювання (розтріскуванню та осипанню), а у зволоженому стані вони опливають, що значно порушує стійкість схилу. "Строкатість" виникає за рахунок присутності вохристо-жовтих, червонувато-жовтих плям. Неглибока глибина залягання строкатих глин у межах схилу є однією з причин активізації зсувних процесів. Наявність тріщин і заколів у верхній частині схилу свідчить про можливість потенційної активізації зсувних процесів. Стінка відриву зсуву продовжує осипатись, змінюючи свою геометрію. Порушення режиму горизонтальної міграції вологи в лесоподібних суглинках створює умови для утворення верховодки та погіршує їх несучу властивість, що в межах цієї ділянки тягне за собою порушення їхньої стійкості, виникнення серії тріщин відриву, і в кінцевому результаті призводить до гравітаційних зміцень.

Електрометричні дослідження геоелектричного розрізу здійснено методом томографії електричного опору (ТЕО). Вимірювання виконано за допомогою багатоелектродного обладнання. Обладнання має такі характеристики: вимірювання здійснюються на постійному струмі; кількість електродів – 64; крок розташування електродів – 1 м; кількість вимірювальних каналів – 1. Для визначення позірного опору використано модифікацію Веннера–Шлюмберже симетричної чотириелектродної установки. Враховуючи малу глибинність досліджень та використання багатокаскадного фільтрувального входного тракту запису, електричні вимірювання здійснювалися за низької напруги живлення близько 40–50 В. Значення струмів у лінії АВ при цьому перебувало в межах 4–50 мА. Обробку даних виконано в програмі RES2dinv, яка дозволяє реалізувати блочні схеми розв'язання оберненої задачі в класі 2D моделей (Loke, 2009). Для інверсії експериментальних даних вибрано алгоритм Оссам–Марквардт, який здійснює комбіновану гладко-контрастну схему інверсії, що базується на використанні Гаус–Ньютона-вського методу найменших квадратів: Оссам – інверсія з використанням оператора згладжування і додатковою мінімізацією контрастності,

яка дозволяє отримати гладкий розподіл параметра (питомого опору ρ); Marquardt – алгоритм інверсії, який забезпечує отримання контрастної моделі розподілу параметра середовища. Використання гладко-контрастної схеми інверсії даних ТЕО дозволяє блоки простору з

близькими значеннями питомого опору об'єднати в один, тим самим реалізовувати також пошарову інтерпретацію результатів зондування з відповідною виразною візуалізацією розрізу.



Рис. 1. Модельний зсувний об'єкт Лиса гора, м. Київ, знімок виконаний за допомогою БПЛА (50°23'46"Пн. ш. 30°33'24"Сх. д)

Для дослідження зсувної небезпеки на локальному рівні застосовується також дистанційний метод інфрачервоної термографії (IRT), що дозволяє виявляти структурні порушення, зони підвищеної обводненості зсувних схилів, склад та структуру найнебезпечніших зсувів. Досвід зарубіжних вчених показав, що теплові аномалії при дослідженні зсувів указують на наявність таких критичних факторів: (i) структурні порушення (за рахунок ефекту охолодження/нагрівання повітря, що циркулює в межах відкритих порушень; різної теплопередачі зсувного матеріалу щодо поверхні схилів); (ii) вологість або зони просочення (через поверхневе охолодження, викликане випаровуванням води) (Frodella et al., 2014). Інфрачервона термографія проводилась за допомогою інфрачервоної (ІЧ) термокаліброваної камери, датчики якої виявляють теплове випромінювання, в результаті чого отримується цифрове зображення ("термограма"). Виконання термографічних досліджень проводилось за допомогою інфрачервоної камери Optiris® PI640 з об'єктивом 33°.

Для дослідження зв'язків між розвитком схилової водної ерозії ґрунтового покриву та подальшим формуванням зсувів було застосовано методику магнітних досліджень. Територія дослідження розташована в Лісо-степовій зоні України. Ландшафт включає локальні катени, які демонструють значні зміни у висоті, включаючи багато пагорбів (плато) та понижені ділянки (локальні балки). Тип ґрунту залежить від особливостей ландшафту та геоморфології місцевості. До геоморфологічних особливостей території належать осипи, зсуви, яри, ерозія ґрунтів. Сірі лісові ґрунти визначені як переважний тип ґрунтів у лісовому ландшафті досліджуваної території. Сірі лісові ґрунти України загалом характеризуються середніми значеннями магнітної сприйнятливості (Меньшов та ін., 2016). Комплекс магнітних досліджень включав польовий та лабораторний етапи вимірювання та аналізів. У польових умовах було проведено рекогносцирувальні роботи, на основі візуального обстеження визначено найефективніші ділянки для проведення вимірювань та відбору зразків ґрунтів. При цьому бралися до уваги наявні зсувні процеси, техногенне забруднення

ґрунтів, можливість відслідковування магнітних параметрів уздовж ґрунтознавчих катен та за вертикаллю (у генетичних горизонтах), процеси водної ерозії. У польових умовах вимірювалася об'ємна магнітна сприйнятливості k (10^{-3} од. СІ) за допомогою польового капаметру ПИМВ-М. За системою конверт у цих же точках проводився відбір зразків ґрунтів. Було закладено ґрунтознавчі розрізи для дослідження перерозподілу природного залягання генетичних горизонтів ґрунтів в умовах зсувних процесів. У лабораторії вимірювалася та розраховувалася питома магнітна сприйнятливості χ (10^{-8} м³/кг) за допомогою капамістка KLY-2. Для розрахунку частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{FD} (%) було виміряно низькочастотну χ_{lf} та високочастотну χ_{hf} магнітні сприйнятливості за допомогою двочастотного магнітометра MS2B. Зауважимо, що під час запланованого наступного етапу досліджень передбачаються магнітомінералогічні вимірювання, які включатимуть термомагнітний аналіз, вимірювання параметрів петлі гістерезису, визначення ізотермічної та безгістерезисної (ідеальної) намагніченостей.

Результати та їх обговорення. На основі функції Weighted Overlay (Spatial Analyst) створено інтегральну карту ймовірності виникнення зсувів Київського Придніпров'я (рис. 2). Було встановлено, що більша частина зсувів приурочена до головних розломів у межах м. Київ (Київський, Святошинський, Деснянський). За допомогою просторового аналізу (Spatial Join (Analyst)) зафіксовано приуроченість зсувів до елювіальних та еолово-делювіальних відкладів лесової формації, схилів південної експозиції, крутизна яких коливається від 10 до 25°, а також розломних зон.

Щодо стратиграфічної приуроченості, то більшість зсувів простежується у відкладах верхнього неоплейстоцену. Для побудови буферних зон навколо розломів використано функцію буферного аналізу. Multiple Ring Buffer (Analysis). За процедурою рекласифікації Reclassify (Spatial Analyst) та розробки відповідної єдиної шкали створено растрові моделі для оцінки вищезазначених факторів на формування зсувів.

Проведено ранжування території за ступенем імовірності виникнення зсувної небезпеки від мінімальної, низької, середньої до високої за процедурою Reclassify (Spatial Analyst). Отже, на основі просторового моделювання проведено комплексний аналіз чинників формування зсувних процесів.

Визначення напружено-деформованого стану (НДС) зсувонебезпечного схилу та обрахунки стійкості схилу в межах Лисої гори базувались на методі граничної рівноваги Моргенштерна–Прайса, який було реалізовано в програмному продукті Slope/W (GeoStudio2020). Визначено, що схил наближається до стану граничної рівноваги ($K_{st}=1,154$). Дані літологічні різновиди (строкаті глини), які є основним деформуючим горизонтом для утворення зсувів у межах цієї ділянки, мають тверду та напівтверду консистенцію, слабостискувані, високопластичні, слабонабухаючі, з низьким опором до зсувних навантажень (0,01 КПа) та значними величинами модуля загальної деформації (40 КПа). Їх склад та властивості зумовлені розвитком ослаблених зон, що підтверджені за допомогою методів інфрачервоної термографії та ТЕО.

Також було отримано дані щодо термічних досліджень, термограми досліджуваної ділянки. Фіксуються "гарячі" теплові аномалії, що приурочені до лінії відриву зсувного тіла. Низькотемпературні аномалії вказують на зміщені лесоподібні суглинки.

Розглянемо коротко результати геофізичних досліджень. Спираючись на результати геоелектричних досліджень, можна стверджувати, що відповідний геологічний розріз має тришарову будову, а також структурні особливості, які можна вважати ознаками зсувного процесу. У нижній частині геоелектричного розрізу

виділяється відносно високоомний (>270 Ом) шар 3, верхня межа якого понижується в напрямку з півночі на південь. Вище, в інтервалі глибин 8,5–3,8 м залягає геологічне тіло, опір якого становить 200–240 Ом. У цій товщі виділяються дві області низьких опорів (60–120 Ом), де можна передбачати зони активізації зсувного процесу внаслідок перезволоження відкладів. Вертикальна потужність кожної із зон не перевищує 5 м. Весь розріз перекривається шаром горизонтального залягання (шар 1 на рис. 5б) з опором 210–800 Ом і максимальною потужністю 4,7 м.

Для розуміння загального розподілу та тенденцій змін магнітної сприйнятливості та її частотної залежності для всіх зразків ґрунту було побудовано гістограми (рис. 3). Розподіл обох параметрів (тобто магнітної сприйнятливості χ та частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{fd}) є нормальним. Права асиметрія розподілу значень χ (рис. 3а) складається з найбільш магнітних проб, відібраних переважно у верхній частині розрізу, а також на схилі 45° ($\chi=60-80 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Всі вони належать до горизонту А (верхній шар ґрунту). Ліву асиметрію розподілу χ формують переважно проби з горизонту В і С ґрунтового профілю ($\chi=10-40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) та ґрунту з перехідних зон між місцевими плато та крутими схилами ($\chi=30-40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Більшість значень лежить у діапазоні $40-60 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, які належать до зразків з низовини та верхніх шарів ґрунту. Розподіл значень частотної залежності магнітної сприйнятливості представлено на рис. 2б. Розподіл нормальний. Відношення значень χ_{fd} до ландшафтного положення або генетичного горизонту ґрунту ускладнене через перерозподіл ґрунту відповідно до ерозії та початкових локальних зсувів, а також через ознаки антропогенного забруднення.

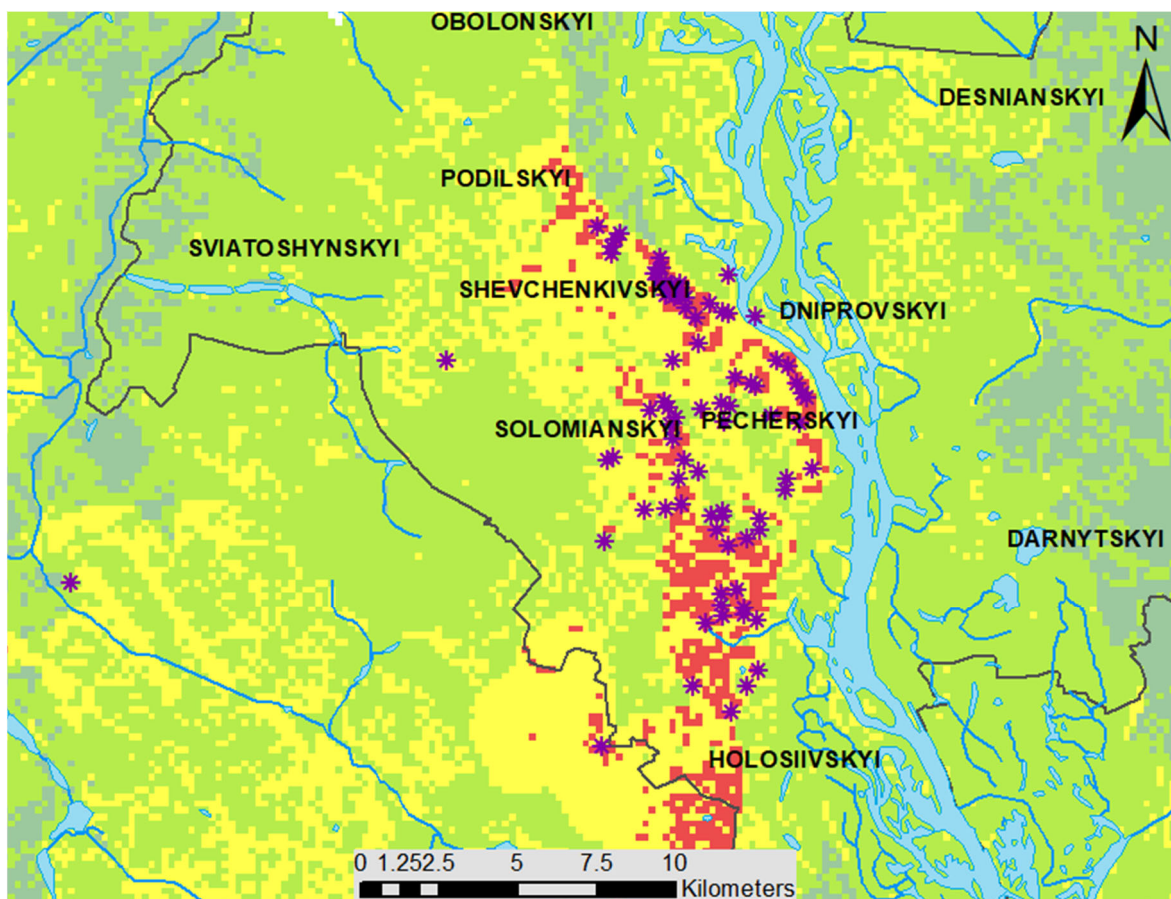


Рис. 2. Карта зсувної сприйнятливості

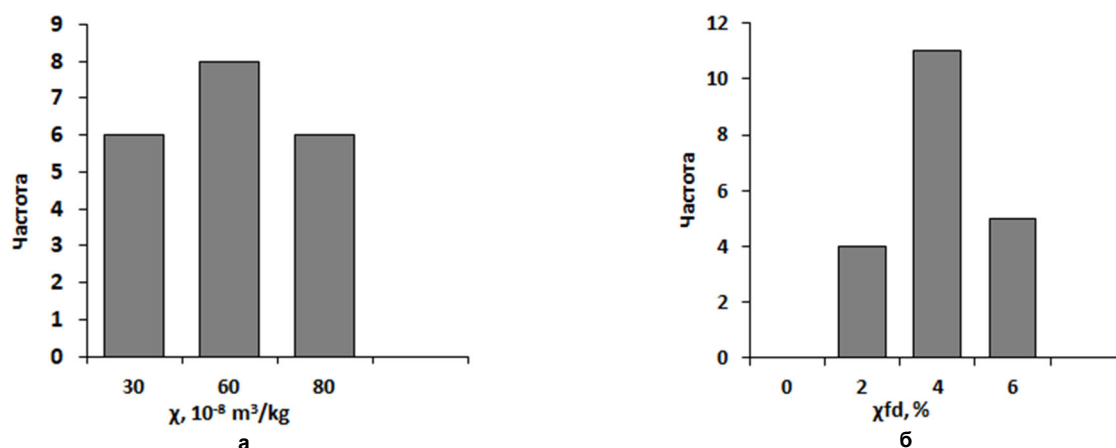


Рис. 3. Результати визначення низькочастотної магнітної сприйнятливості та її частотної залежності для всіх зразків ґрунту зсувонебезпечного об'єкта Лиса гора: а – гістограма розподілу χ ; б – гістограма розподілу χ_{fd} .

Права асиметрія включає зразки з $\chi_{fd}=5-6\%$, що означає педогенез магнітних мінералів (природне походження у процесі ґрунтоутворення) з домішками суперпарамагнітних зерен (SP), а також більш грубих стабільних однодомених (SD) і багатодомених (MD) частинок. Ліву асиметрію складають зразки зі значеннями χ_{fd} менше 2% , що означає антропогенний генезис магнітних мінералів та переважання мультидомених зерен MD (зерна SP наявні з ймовірністю $<10\%$). Статистично найбільш імовірні значення χ_{fd} потрапляють в діапазон $3-4\%$. Ці значення є характерними для зони переходу від антропогенного до педогенного характеру ґрунтового магнетизму. Цей перехід був визначений різними дослідниками саме при значеннях 3 або 4% (Wang et al., 2020; Evans and Heller, 2003).

Отже, результати рекогносцирувальних досліджень території Лиса гора показують, що магнітні методи є експресними, ефективними та низьковартісними при оцінці природних та природно-техногенних процесів, пов'язаних з ерозією ґрунтового покриву та зсувною активністю за умови комплексування з іншими геологічними, геофізичними, ґрунтознавчими методиками та ГІС. На наступному етапі запланований більш глибокий магнітомінералогічний аналіз результатів щодо об'єкта Лиса гора.

Інтегрований аналіз, комплексна оцінка та інтерпретація різномірної інформації для прогнозу поширення зсувних процесів інструментально забезпечується застосуванням ГІС-технологій з їх потужними обчислювальними ресурсами та інформаційною методологією. Однак специфічні ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні умови формування зсувних процесів 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 являє собою класифікатор ознак (чинників) виникнення несприятливих геологічних явищ. Інформативність цих чинників визначається через кількісні характеристики ступеня впливу кожного з них на формування зсувів. Інтегральні дані зсувонебезпеки дають можливість одночасного врахування розглянутих факторів, отримання принципово нової просторової інформації та відповідної реалізації комплексної моделі зсувонебезпеки району. Такі підходи використовуються для створення карт імовірності зсувної небезпеки для різних

регіонів (Zhou et al., 2021; Biswakarma et al., 2019). Отримані результати стосуються загального впливу геолого-геоморфологічних та ландшафтно-кліматичних факторів на формування зсувних явищ. Однак проведення генетичного аналізу зсувів, вивчення їх 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 з конкретними інженерними спорудами. Вони глибше оцінюють природу зсувного процесу, мають найбільше практичне значення і, як правило, здійснюються комплексом методів. Серед них одними з найдієвіших є геофізичні методи, які дозволяють розв'язати проблему визначення поверхні ковзання та зон підвищеної зволоженості ґрунтів.

Відповідно, при виборі геофізичного методу їх досліджень слід у першу чергу звернути увагу на методи неінвазивного визначення фізичних показників, які тісно пов'язані із зволоженістю порід, а саме – електричні методи. Для того щоб геофізичне знімання ефективно розв'язувало проблему моніторингу зсувного процесу, необхідно, щоб фізична властивість середовища – тригер зсувного процесу (як наприклад, вміст води) мала функціональний зв'язок з геофізичним параметром, що визначається. У свою чергу, варіації цього параметра по геологічному розрізу мають однозначно відображати літологічні зміни або коливання фізичного стану літологічно однорідної товщі (Whiteley et al., 2019). Зона подальшої активізації зсуву виділяється завдяки своєму пониженому електричному опору внаслідок постійного зволоження відкладів, які його складають. Надмірне зволоження може бути наслідком руйнування текстури в процесі руху вниз по схилу, що полегшує проникнення води атмосферних опадів до порід тіла зсуву.

Висновки. Основним результатом дослідження є впровадження методології регіонального та місцевого масштабу прогнозування зсувної небезпеки з метою оцінки ризику та розробки адекватних профілактичних заходів. Моделювання та прогнозування зсувних небезпек у регіональному та місцевому масштабах має негайний практичний результат, оскільки є основою для безпечного та ефективного функціонування інфраструктурних об'єктів, зниження соціально-економічних, фінансових та ресурсних ризиків, а також розробки відповідних

заходів запобігання та стратегії пом'якшення наслідків без залучення дорогих традиційних спеціалізованих досліджень. Запропоновано базу даних інвентаризації зсувів Київської області та визначено основні причини утворення зсувів у цьому регіоні. Підготовлено карти зсувної сприйнятливості регіонів. Запропоновано ефективну методику, що включає геологічну, геофізичну, термографічну зйомку та дистанційне зондування для моніторингу зсувних процесів та їх локального прогнозування для модельних майданчиків Київської області. Набір комплексних методів надав корисну інформацію як щодо реконструкції геометрії зсуву, так і щодо гідрологічної характеристики ділянки Лиса гора.

Геофізичні методи незамінні на локальному рівні прогнозування зсувної небезпеки. На Лисій горі за допомогою застосування комплексу методів виявлено дві локальні зони активізації зсувних зміщень, які лежать у діапазоні глибин 3–8 м.

Визначено високу інформативність магнітних методів при дослідженні зсувонебезпечних та ерозійних процесів. Як тестовий полігон використано дослідну ділянку Лиса гора. За результатами вимірювання магнітної сприйнятливості ґрунтів та її частотної залежності зафіксовано перерозподіл природного залягання ґрунтових генетичних горизонтів, що є ознакою розвитку зсувної та ерозійної активності.

Підтвердження. Роботу виконано у рамках держбюджетної теми № 21БП049-02 "Прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня та оцінка впливу на суспільство".

Список використаних джерел

- Кузьменко Е. Д., Безсмертний А. Ф., Вдовина О.П., Крив'юк І.В., Чебан В.Д., Штогрин Л. В. Дослідження зсувних процесів геофізичними методами: монографія. За ред. Е. Д. Кузьменка. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 294 с.
- Іванік О. Методичне забезпечення прогнозування зсувної небезпеки на регіональному та локальному рівні: принципи, методи, моделі. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 2014. № 3. С. 55-60.
- Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, упровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. Вісник КНУ. Геологія. 3(86). 2019. С.70–74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>
- Меньшов, О., Кудеравець, Р., Попов, С., Хоменко, Р., Сухорада, А., Чоботок, І. (2016). Термомагнітний аналіз ґрунтів територій покладів вуглеводнів. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 2(73), 33-37.
- Меньшов, О.І. (2016). Застосування магнітних методів для контролю змін продуктивних земель. Геофізичний журнал, 38(4), 130-137.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 80(1), 40-45.
- Barbosa, R.S., Júnior, J.M., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira, D.S., Peluco, R.G., ... Silva, L.S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. *Environmental earth sciences*, 78(1), 12.
- Biswakarma P, Barman BK, Joshi V, Rao KS (2020) Landslide susceptibility mapping in east Sikkim region of Sikkim Himalaya using high resolution remote sensing data and GIS techniques. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 8(4):143-153. DOI:10.12691/aees-8-4-1
- Eso R., Bijaksana S, Ngkoimani LO, Agustine E, Tamuntuan G, Tufaila M, ... & Usman I (2019) Patterns of variation magnetic properties and chemical elements of soil profile in landslide area of South East Sulawesi Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing 311(1):012008.
- Evans ME, Heller F (2003) *Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics*. San Diego: Academic Press.
- Foster C, Pennington CVL, Culshaw MG, Lawrie K (2012) The national landslide database of Great Britain: development, evolution and applications. *Environmental Earth Sciences* 66(3): 941-953. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1304-5>
- Frodella W, Morelli S, Gigli G, Casagli N (2014) Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum* 3. 2-6 June 2014, Beijing, China.

- Garsia-Rodriguez MJ., Malpica JA., Benito B, Diaz M (2008) Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 95:172-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001>
- Hack R (2000) Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21(4):423-448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hen-Jones RM, Hughes PN, Stirling RA, Glendinning S, Chambers JE, Gunn DA, Cui YJ (2017) Seasonal effects on geophysical-geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotechnica* 12(5):1159-1173. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0523-7>
- Ivanik O., Shabaturova O., Homenko R, Hadiatska K, Kravchenko D (2020) Local forecast of landslide hazards: Case study from Kyiv region. In *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>
- Jordanova N (2016) Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture. Academic press.
- Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 577.
- Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y (2015) Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology* 249:4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Loke MH (2009) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- Pelletier J., Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge, 2008. 295 p.
- Vyzhva S, Onyshchuk V, Onyshchuk I, Reva M, Shabaturova O (2020) Geophysical researches of the landslide territories of the right bank of the Dnieper river (forest-steppe zone). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3(90):36-43. (In Ukrainian). <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.05>
- Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M (2009) Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *First break* 27(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.27.1302.32182>
- Wang L, Liu D, Lu H (2000) Magnetic susceptibility properties of polluted soils. *Chinese Science Bulletin* (45):1723-1726. <https://doi.org/10.1007/BF02898995>
- Whiteley JS, Chambers JE, Uhlemann S, Wilkinson PB, Kendall JM (2019) Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: a review. *Reviews of Geophysics* 57(1):106-145. <https://doi.org/10.1029/2018RG000603>
- Zhou X, Wen H, Zhang Y, Xu J, Zhang W (2021) Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. *Geoscience Frontiers* 12(5):101211. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>

References

- Barbosa, R.S., Júnior, J.M., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira, D.S., Peluco, R.G., ... Silva, L.S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. *Environmental earth sciences*, 78(1), 12.
- Biswakarma P, Barman BK, Joshi V, Rao KS (2020) Landslide susceptibility mapping in east Sikkim region of Sikkim Himalaya using high resolution remote sensing data and GIS techniques. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 8(4):143-153. DOI:10.12691/aees-8-4-1
- Eso R., Bijaksana S, Ngkoimani LO, Agustine E, Tamuntuan G, Tufaila M, ... & Usman I (2019) Patterns of variation magnetic properties and chemical elements of soil profile in landslide area of South East Sulawesi Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing 311(1):012008.
- Evans ME, Heller F (2003) *Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics*. San Diego: Academic Press.
- Foster C, Pennington CVL, Culshaw MG, Lawrie K (2012) The national landslide database of Great Britain: development, evolution and applications. *Environmental Earth Sciences* 66(3): 941-953. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1304-5>
- Frodella W, Morelli S, Gigli G, Casagli N (2014) Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum* 3. 2-6 June 2014, Beijing, China.
- Garsia-Rodriguez MJ., Malpica JA., Benito B, Diaz M (2008) Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 95:172-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001>
- Hack R (2000) Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21(4):423-448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hen-Jones RM, Hughes PN, Stirling RA, Glendinning S, Chambers JE, Gunn DA, Cui YJ (2017) Seasonal effects on geophysical-geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotechnica* 12(5):1159-1173. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0523-7>
- Ivanik, O. (2014). Methodology of predicting landslide hazards on a regional and local scale: principles and models. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 66(3), 55-60.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2019). National database of landslide processes: principles of development, implementation

and application for landslide hazard assessment on regional and local levels. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(86), 70-74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>

Ivanik O., Shabatura O., Homenko R., Hadiatska K., Kravchenko D (2020) Local forecast of landslide hazards: Case study from Kyiv region. In Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>

Jordanova N (2016) Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture. Academic press.

Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management, 577.

Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y (2015) Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. Geomorphology 249:4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>

Kuzmenko, E.D., Bezsmertny, A.F., Vdovina, O.P., Kryvyuk, I.V., Cheban, V.D., Shtogrin, L.V. (2009). Research of landslide processes by geophysical methods. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 294.

Loke MH (2009) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys

Menshov O., Kuderavets R., Popov S., Homenko R., Sukhorada A., Chobotok I. (2016). Thermomagnetic analyzes of soils from the hydrocarbon fields. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 2(73), 33-37.

Menshov, O. I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. Geofizicheskiy Zhurnal, 38(4), 130-137.

Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 80(1), 40-45.

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

Vyzhva S, Onyshchuk V, Onyshchuk I, Reva M, Shabatura O (2020) Geophysical researches of the landslide territories of the right bank of the Dnieper river (forest-steppe zone). Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology 3(90):36-43 (In Ukrainian). <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.05>

Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M (2009) Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. First break 27(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.27.1302.32182>

Wang L, Liu D, Lu H (2000) Magnetic susceptibility properties of polluted soils. Chinese Science Bulletin (45):1723-1726. <https://doi.org/10.1007/BF02898995>

Whiteley JS, Chambers JE, Uhlemann S, Wilkinson PB, Kendall JM (2019) Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: a review. Reviews of Geophysics 57(1):106-145. <https://doi.org/10.1029/2018RG000603>

Zhou X, Wen H, Zhang Y, Xu J, Zhang W (2021) Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. Geoscience Frontiers 12(5):101211. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>

Надійшла до редколегії 19.11.21

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: om.ivanik@gmail.com;

O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: menshov.o@ukr.net

D. Kravchenko, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

K. Hadiatska, PhD (Geol.), Engineer,

L. Tustanovska, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

R. Khomenko, PhD (Geol.), Assist.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

METHODOLOGICAL ASPECTS OF LANDSLIDE RISK ASSESSMENT WITHIN URBAN AREAS (CASE STUDY OF THE MODEL SITE "LYSA GORA", KYIV)

The integrated geological, geophysical, and GIS methods for the overall assessment of the geological hazards within the urbanized environment were considered. The principal gap in the understanding of the geologically hazardous areas in Ukraine (landslide, soil erosion, pollution, etc.) is the lack of information about the properties of rocks and soils as well as their interaction with the past and present natural and anthropogenic formation. The study area is the landslide activation territory of Lysa Gora in Kyiv, Ukraine (Golosiivsky district). The slope has the conditional stabilization. At the same time the landslides provide the real dangery to the infrastructure facilities. One of the examples is the deformation of the railway along the Stolychne Highway. Landslide susceptibility data have been collected. The proposed methodology consists of the geological, geophysical, thermography, and remote sensing. This methods provide the possibility for the monitoring of landslides at the model areas in Kyiv region. The electrical resistivity tomography at the Lysa Gora identified two local zones of activation of landslide displacements, which are located in the range of depths of 3-8 m from the ground surface. The random distribution of the soil magnetic susceptibility and frequency dependence of the magnetic susceptibility both on lateral and verical line (soil genetic horizons) identified the presence of the displacement, redistribution and deposition of the soil and underlying rocks. All the mentioned factors are in the genetic relation to the soil erosion and initial landslides.

Keywords: landslide hazards, slope stability, geomorphology, electrical resistivity tomography, magnetic susceptibility, soil.

Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: om.ivanik@gmail.com;

А. Меньшов, д-р геол. наук, ст. исследователь,

E-mail: menshov.o@ukr.net

Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,

К. Бондарь, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,

Е. Гадяцкая, канд. геол. наук, инж.,

Л. Тустановская, канд. геол. наук, доц.,

Р. Хоменко, канд. геол. наук, ассист.

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕЙ В ПРЕДЕЛАХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОГО УЧАСТКА ЛЫСАЯ ГОРА, КИЕВ)

Рассмотрено комплексирование геолого-геофизические и ГИС-методов для оценки геологической опасности в пределах урбанизированной среды. Принципиальным пробелом в изучении геологически опасных (оползни, эрозия, загрязнение и др.) территорий Украины является отсутствие информации о состоянии горных пород и почв, а также их взаимодействии с прошлыми и современными природными и антропогенными образованиями. Объектом исследования является территория оползневой активизации Лысой горы, Украина, расположенная в Голосеевском районе Киева. Несмотря на условную стабилизацию склона, оползни представляют реальную угрозу функционированию объектов инфраструктуры, в частности деформации железной дороги вдоль Столичного шоссе. Получены результаты исследования оползнеопасных участков. Предложена эффективная методика, включающая геолого-геофизическую, термографическую съемку и дистанционное зондирование для мониторинга оползневых процессов и их локального прогнозирования на модельных участках. Результаты измерения методом электротомографии на Лысой горе выявили две локальные зоны активизации оползневых смещений, которые располагаются в диапазоне глубин 3–8 м от поверхности земли. Случайное распределение магнитной восприимчивости почвы и частотная зависимость магнитной восприимчивости в пределах ландшафтных пересечений и по вертикали в почвенных генетических горизонтах подтверждают наличие смещений, перераспределений и новоотложений почвы и подстилающих пород. Это связано с эрозионными и оползневыми процессами.

Ключевые слова: оползневая опасность, устойчивость склонов, геоморфология, электротомография, магнитная восприимчивость, почва.