

О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: ivanik@knu.ua;

В. Шевчук, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: svgeol44@gmail.com;

Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua;

К. Гадяцька, канд. геол. наук, асист.,
E-mail: k.hadiatska@knu.ua;

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ НА СУСПІЛЬСТВО: ГОЛОВНІ ПІДХОДИ, ПРИНЦИПИ, МЕТОДИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки георизиків та катастроф природного характеру, яка, незважаючи на вибір тих чи інших підходів щодо її розв'язання, вимагає всебічного поглибленого аналізу чинників формування зсувів, а також синтезу наукових та фондових матеріалів для повного розуміння проблеми зсувної небезпеки та комплексної оцінки її впливу на суспільство. Представлені у даній статті дослідження спрямовані на розробку, впровадження та апробацію комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки та оцінки її впливу на функціонування природно-техногенних систем різного призначення в межах України. Дослідження проводились у рамках державних та міжнародних проєктів із залученням міжнародних партнерів з університетів Франції, Австрії та Великої Британії. Методика регіонального прогнозування зсувної небезпеки в межах різноструктурних регіонів України базується на методах просторового моделювання та геоінформаційного аналізу з метою прогнозного картування, отримання оцінки ймовірного розвитку гравітаційних процесів, створення моделей багатофакторної просторової оцінки. У результаті комплексного аналізу чинників зсувної небезпеки та просторового моделювання створено інтегральні карти зсувної небезпеки, що дають можливість комплексно оцінити стан зсувонебезпеки для кожного регіону. Методики локального прогнозування зсувної небезпеки на основі застосування раціонального комплексу геологічних, геофізичних, дистанційних, термографічних досліджень, а також детермінованого моделювання дозволяють виявити головні ознаки та визначити ділянки потенційного розвитку зсувних процесів у межах окремих зсувонебезпечних ділянок та запропонувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та уникнення їх негативної дії. Наведено приклади застосування комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки в межах модельних ділянок Канівського та Київського Придніпров'я та запропоновано концепцію інформування населення щодо потенційних геонебезпек.

Ключові слова: зсувна небезпека, стійкість схилів, прогнозування, детерміноване моделювання.

Вступ та постановка проблеми. Проблема прогнозування впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування інфраструктурних об'єктів з метою запобігання надзвичайним ситуаціям та уникнення економічних і соціальних проблем є однією з найактуальніших проблем у сфері оцінки георизиків та катастроф. Розв'язання цієї проблеми охоплює два аспекти: перший – цільові територіальні дослідження, спрямовані на пізнання природи та уточнення механізму формування і поведінки у геологічному середовищі небезпечних явищ з урахуванням природних чинників та факторів техногенного впливу, і другий – розроблення сучасних ефективних засобів інформаційно-аналітичного забезпечення цільових досліджень і заходів, спрямованих на попередження небезпечних геологічних процесів та їх адекватну якісну та кількісну оцінку (Баєрій та ін., 2004; Демчишин, 1992; Іванік та ін., 2016; Лисиченко та ін., 2008; Національна..., 2020; Прогнозування..., 2016).

Всі геологічні процеси, що відбуваються в надрах Землі та на її поверхні, діють у тому чи іншому полі гравітації, але так склалося, що до гравітаційних процесів відносять лише екзогенні, передусім обвали, осипи, камінепади і зсуви. Враховуючи співставний за наслідками вплив води (обводненості геологічних середовищ) чи флюїдів загалом, також виділяють в окрему класифікаційну категорію водно-гравітаційні процеси, доповнюючи список явищ опливами, селями і т. ін. Таке розмежування екзогенних та ендемогенних процесів, пов'язаних із гравітацією, зручне, але не зовсім коректне, хоча б тому, що вплив тектонічних рухів ендемогенної природи має визначальне значення у розвитку екзогенних

гравітаційних процесів. Тобто прогнозна оцінка розвитку екзогенних гравітаційних процесів не може бути успішною без врахування тенденцій тектонічної еволюції того чи іншого регіону. Отже, у визначенні провідних і підпорядкованих факторів гравітаційних та водно-гравітаційних процесів не варто обмежуватись умовностями. Впевнено можна сказати, що тисячолітня історія досліджень і самих процесів, і факторів, що спричиняють їхній розвиток, позначилась мало не цілковитим розумінням суті процесів і їх наслідків, прогновної оцінки ймовірності виникнення і шляхів розвитку, розробкою ефективних комплексних засобів запобігання і боротьби з небезпечними для людини явищами. У теоретичному плані відомо багато, майже все необхідне. Розроблено детальні класифікації гравітаційних процесів, запропоновано методи їх оцінки та прогнозування, висвітлено питання щодо детальних рекомендацій їх запобігання та мінімізації впливу (Hung et al., 2014). Такий стан досягався колосальним обсягом і різноманітністю емпіричних даних, отриманих не лише в межах континентів, але й морів і океанів, розвитком експериментальних досліджень, інженерних розрахунків (XX ст.) та сучасного математичного моделювання. Нові теоретичні дані досягаються усе рідше, деякі традиційні методи досліджень себе вичерпують, розробка нових – це складний і непередбачуваний шлях. Теоретично невідоме у цих процесах пов'язане з неймовірною різноманітністю геологічних середовищ, ситуацій, комбінаційності факторів впливу, у тому числі випадкових. Саме такі обставини мають безпосередній вплив на людську життєдіяльність.

Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки ризиків та катастроф природного характеру, яка, незважаючи 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 (*Ivanik ta in., 2020*). Світовий досвід у сфері дослідження гравітаційних процесів показав значну ефективність застосування комплексного синергетичного підходу до їх оцінки при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів (*Foster et al., 2008, 2012; Garsia Rodriguez et al., 2008; Pan et al., 2008*).

Сучасні прогнозні методики та підходи моделювання гравітаційних поєсів при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів регіонального рівня розроблені фахівцями Геологічної служби Великої Британії, США, Японії та інших країн. Методи моделювання та ГІС активно застосовуються для отримання оцінки ймовірного розвитку зсувів, створення моделей багатofакторної просторової оцінки та прогнозного картування (*Abbaszadeh Shahri and Maghsoudi Moud, 2021; Nohani et al., 2019; Zhou et al., 2021*). При цьому для створення ймовірнісних моделей зсувної небезпеки високої роздільної здатності використовуються нейронні мережі (*Elmoulat et al., 2020*). Для локального прогнозування зсувів виконується детальне вивчення зсувних процесів і зсувонебезпечних об'єктів із використанням геологічних, геоморфологічних, геофізичних та дистанційних методів та подальшим застосуванням детермінованого моделювання для оцінки стійкості схилів (*Biswakarma et al., 2020; Cees, 2020; Daout et al., 2021*). Важливою проблемою є вибір реологічних моделей при моделюванні зсувного процесу та розробці фізико-геологічних моделей породних комплексів у межах зсувних схилів (*Wu, 2015*).

У сучасних дослідженнях значного використання набувають методи машинного навчання та штучного інтелекту, що використовуються для запобігання зсувам, головним чином зосереджуючись на виявленні зсувів на основі даних дистанційного зондування Землі, оцінці сприйнятливості територій до виникнення та активізації зсувів та розробці систем попередження про зсуви (*warning systems*) (*Ma et al., 2021*).

Однак, незважаючи на великий обсяг запропонованих підходів, методик та методів, слід зазначити, що кожен регіон має свої особливості як з погляду розвитку геологічних процесів, так і з позиції розвитку інфраструктури, будівництва, виробництва тощо. Отже, цілеспрямовані регіональні дослідження є необхідними, а нові досягнення у детальному вивченні конкретних потенційно небезпечних регіонів та районів завжди матимуть важливе якщо не теоретичне, то прикладне значення.

Представлені у даній статті дослідження спрямовані на розробку, впровадження та апробацію комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки та оцінки її впливу на функціонування природно-техногенних систем різного призначення в межах України. Дослідження проводились у рамках державних та міжнародних проєктів із залученням міжнародних партнерів з університетів Франції, Австрії, Великої Британії.

Головні принципи та методи регіонального прогнозування зсувної небезпеки. Регіональне прогнозування зсувної небезпеки 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, умови їх виникнення та активізації, а також визначає ймовірність їх виникнення в межах певних територій. До класу методів якісного прогнозування зсувної небезпеки належать методи, що базуються на експертних оцінках та методи оцінки стійкості території в балах. До існуючих методик регіонального прогнозування зсувів належать такі: методика прогнозування за допомогою методу логічного повернення до попереднього стану; методика із залученням ROC аналізу (*receiver operating characteristic curve analysis*), оверлейний аналіз та ін (*Cees, 2000; Foster et al., 2008; Garsia Rodriguez et al., 2008; Gorsevski et al., 2006; Pan et al., 2008; Saha et al., 2005*). До методів прогнозу, що використовують статистичні методи, належать методи геодинічного потенціалу, регресійного аналізу, багатовимірної статистики та інші.

Методика регіонального прогнозування зсувної небезпеки в межах різноструктурних регіонів України базується на методах просторового моделювання та геоінформаційного аналізу з метою прогнозного картування, отримання оцінки ймовірного розвитку гравітаційних процесів, створення моделей багатofакторної просторової оцінки (*Кошляков та ін., 2003*).

Інформація, отримана під час комплексних досліджень зсувних процесів, належить до особливого типу геоінформації, яка характеризує положення досліджуваних об'єктів у системі просторових координат. Така інформація повинна стати багатocільовим інформаційним ресурсом. Існуючі на сьогодні великі масиви даних щодо гравітаційних процесів та їх різномірних характеристик є особливим об'єктом геоінформаційних та моніторингових досліджень, що потребують застосування методологічних прийомів на новому інформаційному рівні. З метою просторового аналізу небезпечних геологічних процесів, оцінки чинників їх формування та активізації, а також з метою їх прогнозування на регіональному та локальному рівні виникає потреба у створенні відповідної геобаз даних. Геобаза даних зсувних процесів за типами взаємовідношення просторової та атрибутивної інформації є геореляційною і характеризується певними типами зберігання позиційних та атрибутивних даних. Крім цього, геобаза даних акумулює в собі змістові дані щодо процесів та чинників зсувоутворення, відомості про їх територіальну і часову прив'язку тощо. Водночас геореляційна база даних зсувних процесів і факторів їх виникнення є основою для інвентаризації, моніторингу та регіонального прогнозування зсувних процесів, що і пропонується використовувати в більшості регіональних досліджень.

Формування геобаз даних містить у собі концептуальний, логічний та фізичний рівні, на кожному з яких створюється відповідна модель (*Ivanik ta in., 2019*). Геобаза даних зсувів створюється на основі власних польових спостережень та фондових матеріалів, кожний із записів якої містить інформацію, охарактеризовану певними атрибутами, включаючи *морфометричні параметри зсувних тіл* з характеристиками їхньої форми, типу, ширини, довжини, об'єму зсувних мас, площі поширення, місця їх локалізації в межах схилу з точними абсолютними відмітками, механізм зміщення зсуву, чинники виникнення; *характеристик зсувних схилів*, включаючи дані про експозицію, крутизну, протяжність, висоту та форму схилу в плані, його геоморфологічну належність, літологічний склад основних деформуючих горизонтів (ОДГ) та гідрогеологічні умови. Ці дані разом із подальшим просторовим аналізом та моделюванням дозволяють розробити прогнозно-еталонні критеріальні моделі зсувних процесів; запропонувати перелік критеріїв і ознак їх

формування та створити регіональні карти ймовірності виникнення зсувів.

Регіональне прогнозування зсувних процесів базується на основі поглибленого вивчення стану геологічного середовища та впливу статичних та динамічних факторів, які тісно пов'язані між собою. До числа статичних належать: (1) *літолого-стратиграфічні умови*: наявність у розрізі схилу порід різної водопроникності, що залежить від щільності порід та їх мікроструктури, яка впливає на характер і тип прояву деформаційного процесу, а отже і на тип формування зсуву; (2) *морфологія рельєфу*: величина вертикального та горизонтального розчленування рельєфу, показники абсолютних відміток, крутизна схилів та їх експозиція; (3) *гідрогеологічний режим*: глибина залягання поверхневих та ґрунтових вод, наявність і витримана потужність водотриву в основі водоносного горизонту, а також тип порід, що складають водоносний горизонт. До динамічних факторів відносять змінні в часі процеси, що впливають на стан схилів: (i) *тектонічний режим території* – прояв неотектонічних та сучасних тектонічних рухів, що є одним із

провідних факторів зсувоутворення; (ii) *прояв екзогенних процесів*; (iii) *сейсмічність*; (iv) *техногенні навантаження*, у тому числі вібраційні.

Для оцінки чинників зсувної небезпеки використовуються такі тематичні карти та відповідні тематичні шари: цифрові моделі рельєфу, літолого-стратиграфічні карти, карти четвертинних відкладів, тектонічні карти, гідрогеологічні карти, карти крутизни схилів, карти експозиції схилів, дані щодо просторового положення зсувів тощо. Для просторового аналізу та побудови прогнозних карт зсувної небезпеки здійснюється векторизація різномасштабних (1:200 000 – 1:50 000) геологічних карт території, тектонічних карт, гідрогеологічних карт, карт четвертинних та дочетвертинних відкладів із формуванням відповідних шарів полігонального та лінійного типу геометрії, та зсувних об'єктів точкового типу геометрії.

З метою оцінки впливу факторів на формування зсувних процесів створюється низка просторових моделей (тектонічних, геоморфологічних, геологічних, структурно-морфометричних та ін.) (рис. 1).

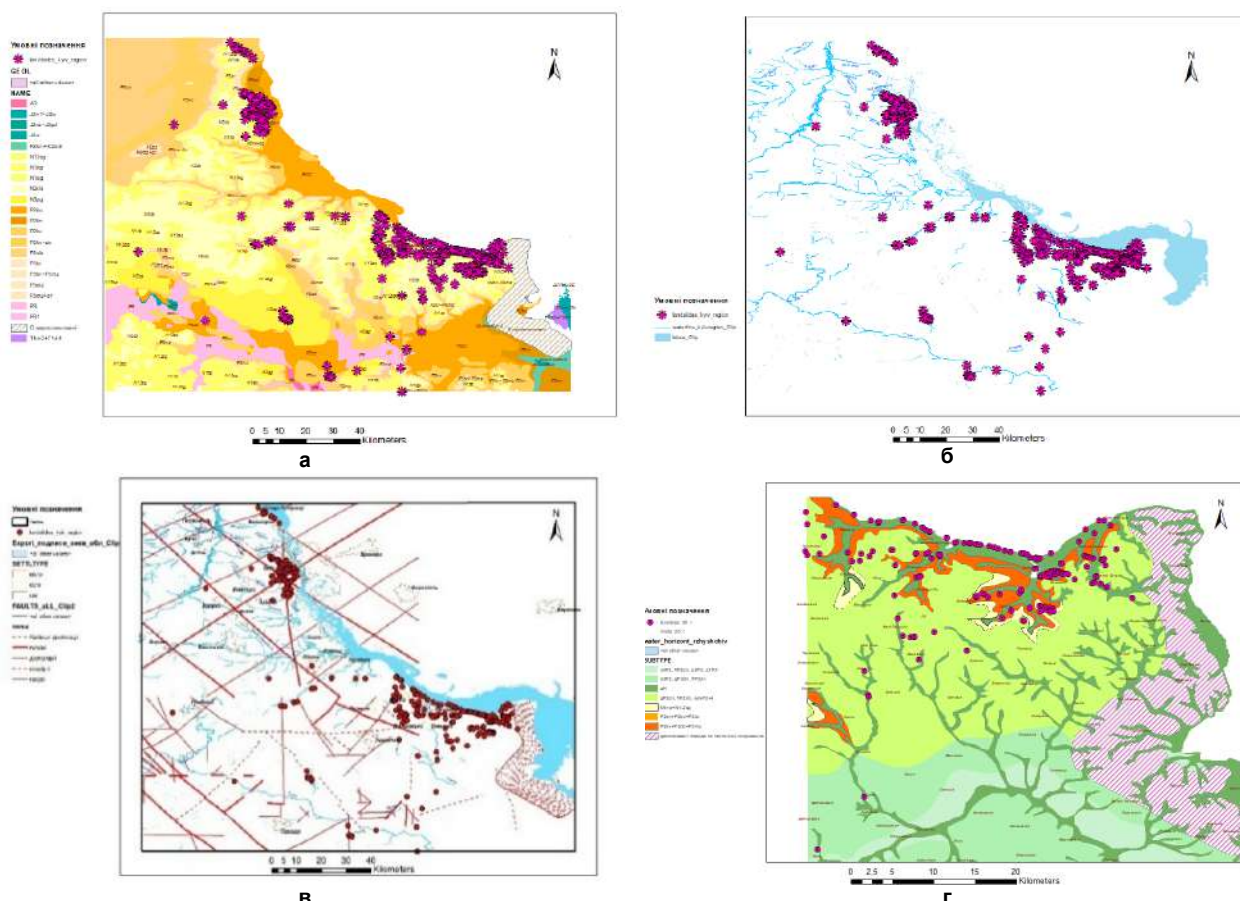


Рис. 1. Різноманітні моделі для оцінки зсувної небезпеки Середнього Придніпров'я:

а) векторна модель літолого-стратиграфічних комплексів; б) гідрологічна модель; в) структурно-тектонічна модель; г) гідрогеологічна модель

У результаті комплексного аналізу чинників зсувної небезпеки та просторового моделювання створюються інтегральні карти зсувної небезпеки як для території в цілому, так і для окремих ділянок, що дають можливість комплексно оцінити стан зсувонебезпеки для кожного регіону. Для побудови *прогнозно-еталонної моделі зсувної небезпеки* на основі просторового аналізу та моделювання, схему якого представлено на рис. 2, виконується комплексний аналіз чинників формування зсувних

процесів. Засобами рекласифікації здійснюється ранжування кожного фактору за ступенем впливу на зсувоутворення. На основі функції Weighted Overlay (Spatial Analyst) створюється інтегральна карта ймовірності виникнення зсувів певної території. Отже, прогнозна карта (рис. 3) створюється методом оверлейних перетворень, що дає можливість одночасного врахування розглянутих факторів та розробки комплексної моделі зсувонебезпеки регіону.

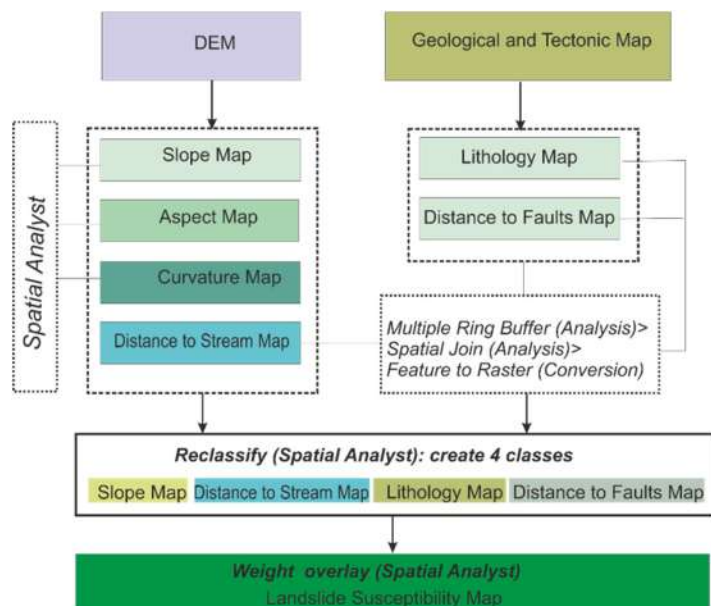


Рис. 2. Схема розробки моделі зсувонебезпеки на основі просторового аналізу та моделювання

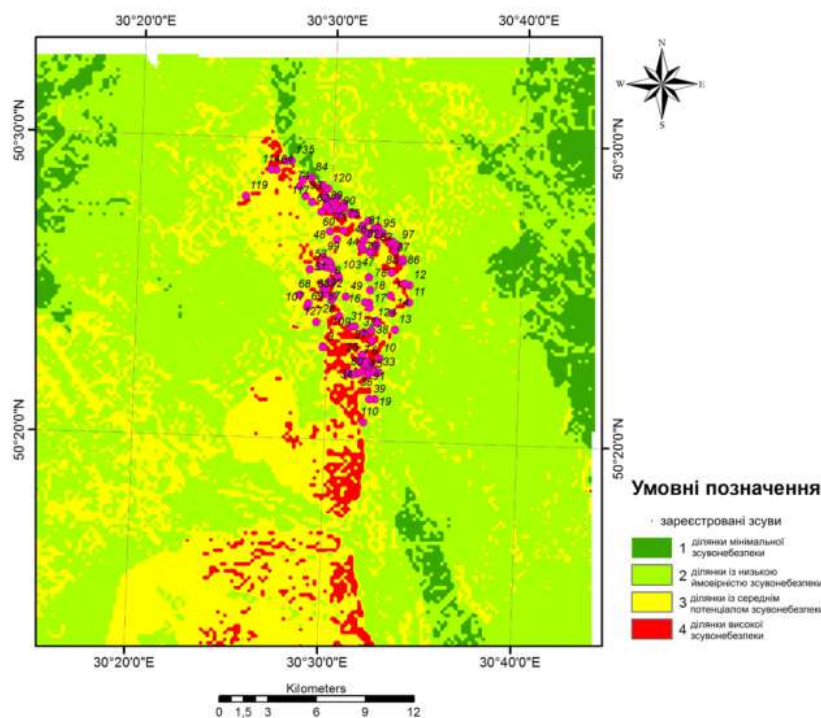


Рис. 3. Прогнозна інтегральна карта зсувонебезпеки Київського Придніпров'я

Головні підходи та методи локального прогнозування зсувної небезпеки. Проведення генетичного аналізу зсувів, вивчення їхньої динаміки та режиму можливе тільки під час детальних досліджень, визначенні пріоритетності впливу кожного з факторів на процес зсувоутворення. Саме такі роботи становлять основу локального прогнозування зсувної небезпеки. Загалом методи локального прогнозування мають на меті оцінку динаміки стану зсувонебезпечних схилів та зсувних тіл та аналіз стійкості схилів з метою прогнозування небезпеки розвитку зсувного процесу.

На основі локальних прогнозів досліджуються певні типи схлизових процесів, визначається їхня локалізація та взаємодія з конкретними інженерними спорудами (Whiteley et al., 2019). 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, наприклад, такі як наземні радіолокаційні системи із синтезованою апертурою (GB-InSAR). Їх використовують для моніторингу деформації поверхні землі, оцінки можливого ризику зсуву та аналізу тенденції руху (Frodella et al., 2018; Daout et al., 2021). Ці методи дають можливість краще оцінити природу, механізм та головні фактори зсувного процесу.

Для вирішення задач аналізу динаміки стану зсувонебезпечних схилів оптимальним та ефективним є використання даних дистанційного зондування Землі, що

модуть бути застосовані для кількісної оцінки змін, які виникли внаслідок природних та антропогенних чинників активізації зсувних процесів. Серед методів дослідження зсувів із застосуванням даних дистанційного зондування Землі слід виділити:

- дешифрування аерофотознімків;
- використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та створення тривимірних моделей зсувів;
- інтерпретацію оптичних зображень, аналіз мультиспектральних зображень, використання даних SAR-радарів із синтезованою апертурою та ін.

Крім того, дані, отримані БПЛА, використовуються для створення цифрових моделей рельєфу високої розрізненості, а також точних обстежень поверхні зсувів (рис. 4). Точність моделі залежить від високоякісних вхідних даних. Використовуючи безпілотники, є можливість визначити загальні морфометричні характеристики зсувних схилів та тіл, а також визначити ймовірний механізм зсуву.



Значні результати щодо детальних характеристик будови зсувних тіл та зсувонебезпечних схилів отримують завдяки використанню численних інструментальних моніторингових спостережень (Hack, 2002; Прогнозування..., 2016; Кузьменко та ін., 2009). Методика локального прогнозування зсувної небезпеки для оцінки стану зсувних схилів на основі комплексу інструментальних неінвазивних геофізичних та термографічних методів розроблена на прикладі модельних ділянок у межах Середнього Придніпров'я (Ivanik et al., 2022).

До даного комплексу методів належать такі: метод самочинної поляризації, метод електротомографії, георадарні дослідження, методи інфрачервоної термографії, які вирізняються високою детальністю спостережень, експресністю та простотою у використанні (Telford, 1990; Santoso et al., 2019; Ivanik et al., 2020). Дані, отримані за допомогою вищезгаданих методів, застосовуються для дослідження літолого-стратиграфічних умов, геометрії тіла зсуву та потенційного руху зсувних мас (рис. 5).

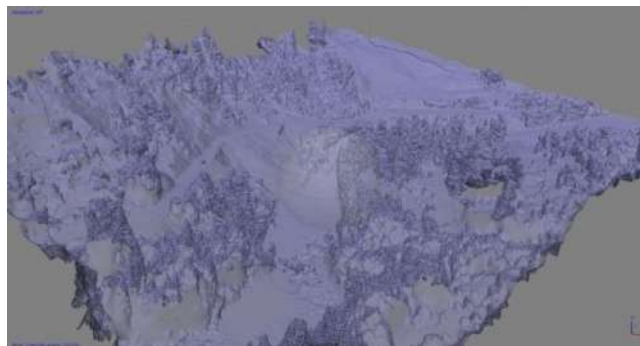


Рис. 4. Тривимірна модель зсуву в с. Красник, Верховинський район Івано-Франківська обл. (за даними знімання з БПЛА)

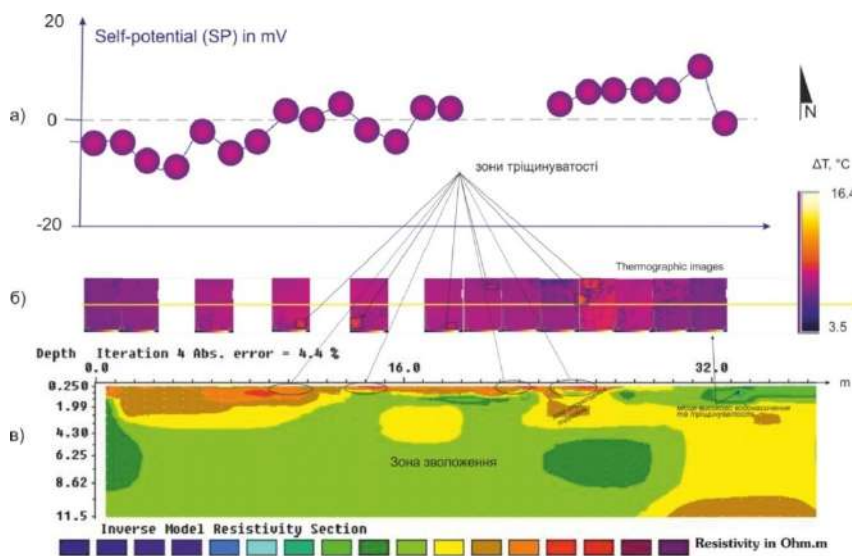


Рис. 5. Приклад комплексного застосування неінвазивних геофізичних методів та інфрачервоної термографії для оцінки зсувної небезпеки в межах модельного об'єкта "Глинка", м. Київ:

а) графік розподілу кривої самопотенціалу; б) термограми; в) частина геоелектричного розрізу по профілю ERT4 (з 1 по 36 пікет)

Метод самочинної поляризації застосовується для відслідковування рівня ґрунтових вод та водних потоків у межах схилу (Patella, 1997; Reynolds, 1997). Спостереження проводять шляхом вимірювання природної різниці електричних потенціалів між парами електродів, підключених до вольтметра високого опору. Електророзвідувальні роботи широко застосовуються для виявлення та

простеження тріщинуватих зон і зон тектонічних порушень, що дозволяє виявити обводнені ділянки.

Метод електротомографії (ERT) застосовується для локального прогнозування зсувних процесів з метою одночасного вивчення розрізу уздовж профілю й по глибині, що дозволяє простежувати не лише горизонтально-шаруватий розріз, а й неоднорідне середовище. Також цей

метод дає змогу виявити особливості будови зсувних тіл та відстежити нові тріщини і заколи на зсувонебезпечних ділянках. Завдяки методиці проведення досліджень (ERT) можна виконувати інтерпретацію не лише у 2D, а й у 3D варіанті, за рахунок високої щільності спостережень, які досягаються шляхом використання багатоканальної установки (64-електродної), що дозволяє вимірювати різницю потенціалів одночасно на декількох приймальних електродах (Loke, 2009; Khomenko et al., 2013).

В основі георадарних досліджень є явище відбиття електромагнітних хвиль від границь поверхонь розділу, на яких відбувається зміна електричних властивостей. Основним параметром середовища виступає діелектрична проникність. Даний метод широко використовується

в інженерній геофізиці з метою вивчення геологічного розрізу, визначення рівня ґрунтових вод, а також для картування карстових та зсувних структур.

Також для дослідження зсувної небезпеки локальних об'єктів використовується дистанційний метод інфрачервоної термографії, що дозволяє виявляти структурні порушення та зони підвищеної обводненості зсувних схилів, а отримання високорозрізнених термограм земної поверхні з максимально малих відстаней є високоінформативним методом у геологічних дослідженнях (Frodella et al., 2014). За допомогою даного методу та спеціальних польових досліджень визначається склад та структура найнебезпечніших зсувів (рис. 6).

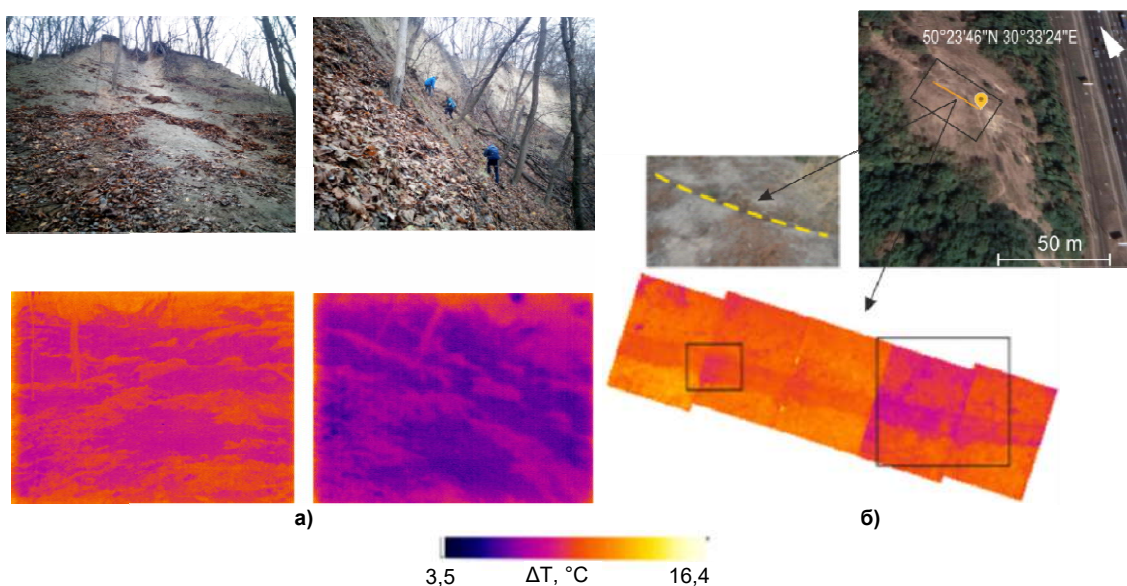


Рис. 6. Термограми в межах модельної ділянки "Лиса гора" (Київ):

а) термограма зсувного схилу на ділянці № 2 Лисої Гори (50°23'40" пн 30°33'19"E);

б) термограма профілю 1, виконаного у верхній частині зсуву (50°23'46"N 30°33'24"E) (перпендикулярно до зсувного уступу)

Інфрачервона термографія здійснюється за допомогою інфрачервоної термокаліброваної камери, датчики якої виявляють теплове випромінювання, яке перетворюється вбудованим процесором на карту температури поверхні досліджуваної ділянки. Виконання термографічних досліджень проводиться за допомогою інфрачервоної камери *Optris® PI640* з об'єктивом 33°. За допомогою програмного забезпечення *Optris® PIX Connect* отримуються термограми досліджуваних ділянок, що представлені за допомогою кольорової шкали. Більш низькі значення температури поверхні представлені темно-синіми кольорами, тоді як більш високі значення відображаються світло-жовтими кольорами. Теплові аномалії при дослідженні зсувів вказують 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, спричинене випаровуванням води).

Високу ефективність у вивченні динаміки зсувних процесів мають методи геомагнітних досліджень, що використовуються для визначення потенційності зсувного процесу та аналізу швидкості та напрямку переміщень (Menshov et al., 2018).

Під час вивчення локальної стійкості зсувів широке застосування знаходять методи математичного моделювання. Ці методи поділяються на групу традиційних методів інженерних розрахунків та групу чисельних методів аналізу. Традиційні методики базуються на методах граничної рівноваги, методах кінематичного аналізу та методах статистичного аналізу руху. До другої групи належать методи, що базуються на механіці суцільного середовища, механіці дискретного середовища та гібридні методи. Слід зауважити, що означені методи вирішують велику частину прикладних завдань щодо забезпечення стійкості схилів, однак вони значною мірою схематизують як геологічні умови схилів, так і особливості зсувних зміщень. Безумовно додаткового врахування потребують питання розподілу напружень у породних комплексах схилу, анізотропія, наявність різномасштабних тектонічних порушень, відмінність геомеханічних параметрів тощо. Необхідним є подальше дослідження та удосконалення методів розрахунків стійкості неоднорідних схилів, аналіз впливу тригерних факторів тощо.

Частково означені питання вирішуються на основі аналізу напружено-деформованого стану схилу із врахуванням низки геологічних та геоморфологічних факторів, що стосуються переважно аналізу впливу підвищеної тріщинуватості, наявності надмірної обводненості породних комплексів, існування надмірного

навантаження на зсувонебезпечний схил і базових фізико-механічних характеристик. Для модельних зсувонебезпечних схилів здійснено постановку задачі розрахунку НДС та визначено ступінь схематизації (формалізації) розрахунків (Ivanik, 2015). На основі застосування спеціалізованого програмного забезпечення *GeoStudio2018* визначається розподіл напружень (рис. 7). Водночас використовуються різні реологічні

моделі. У процесі моделювання зсувне тіло розбивається на вертикальні відсіки (блоки). Для того щоб оцінити прогноз інженерно-геологічних змін у межах певної ділянки схилу, створюються дві геомеханічні моделі: для природного рівня водонасичення ґрунтів та прогнозованого, що дає змогу здійснити прогноз зсувного процесу за критичних умов.

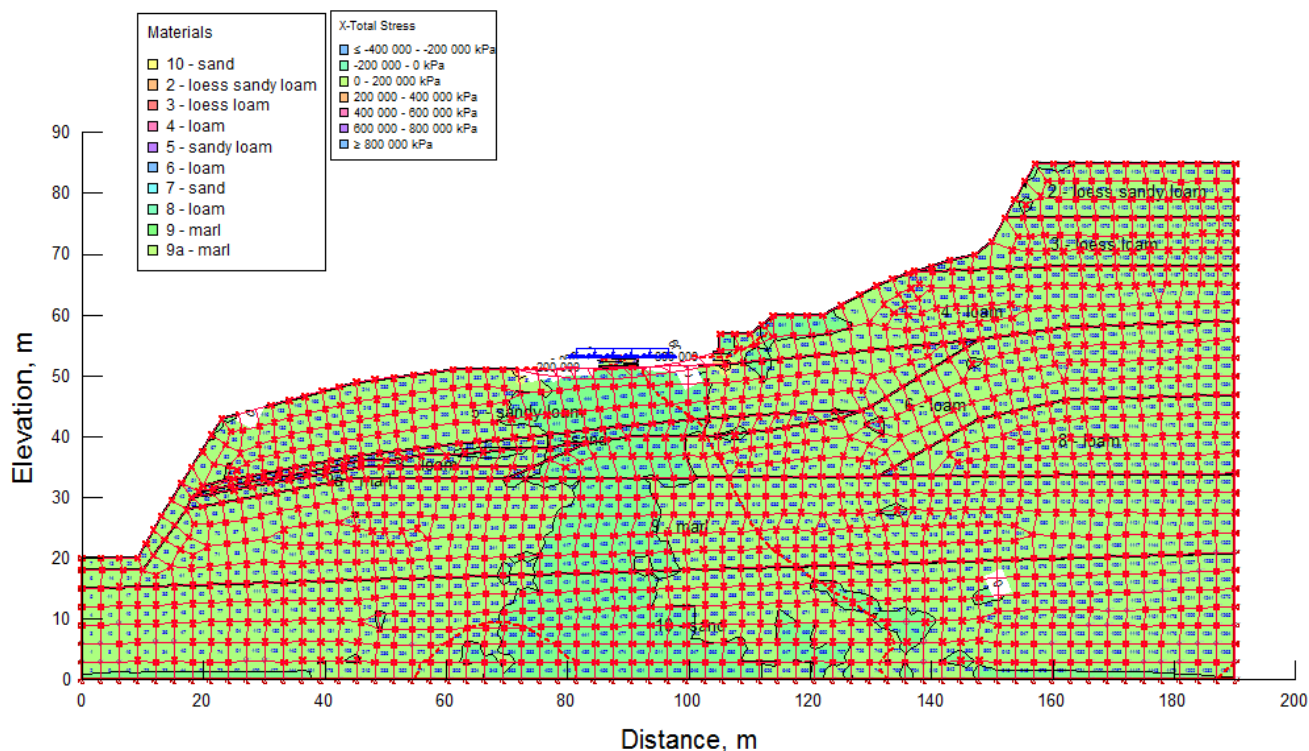


Рис. 7. Розподіл напружень у межах зсувонебезпечного схилу, модельна ділянка "Ржищів", Київська обл.

Оцінка впливу зсувної небезпеки на суспільство та розробка стратегії інформування населення щодо потенційних геонебезпек.

Зсувонебезпе́ка є важливою складовою екологічної безпеки територій. Запобігання та мінімізація наслідків негативного впливу розвитку зсувних процесів пов'язані передусім із прогнозуванням та стратегією інформування населення щодо потенційних геонебезпек. Прогнозування зсувів як надзвичайної ситуації потребує здійснення певних дій у певній їх послідовності, тобто може бути алгоритмізоване. З метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, спричинених формуванням та активізацією зсувів, необхідно: удосконалити механізм регулювання та контролю за проведенням господарської діяльності на зсувонебезпечних територіях; здійснити економічно обґрунтовані протизсувні заходи до початку господарського освоєння зсувонебезпечних територій; визначити межі зсувонебезпечних ділянок та здійснити районування території за ступенем зсувонебезпеки, включаючи урбанізовані території, промислові агломерації та інші складні природно-техногенні системи; забезпечити належний рівень інформування населення щодо питань здійснення протизсувних заходів.

Щоб забезпечити ефективність стратегії інформування, вона має бути орієнтована на локальні адресні групи населення. Мета подібної стратегії полягає у використанні потенціалу окремих осіб та цілих громад, що наражаються на небезпеку зсувів, з метою вжиття ними

необхідних і своєчасних заходів щодо зниження ймовірності загибелі, шкоди довкіллю та втрати засобів існування.

Метою стратегії інформування населення щодо зсувних небезпек є сприяння досягненню сталого розвитку, інтеграція системи запобігання ризикам зсувної небезпеки у процеси інституційних реформ та зміцнення спроможності територіальних громад з протидії зсувів. Передбачається, що Стратегія забезпечить уніфікований підхід до протидії природним загрозам. Сучасне бачення головних пріоритетів полягає в тому, що на протипагу діяльності, спрямованої лише на ліквідацію наслідків зсувів, основну увагу слід зосереджувати на мінімізації ризиків втрат і збитків, спричинених цими небезпечними явищами. Перспективи подальших наукових досліджень визначаються необхідністю ґрунтовного опрацювання організаційних та правових засад державного управління, переосмислення основних категорій у цій сфері.

Висновки. Комплексна методика прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня спрямована на розробку засобів прогнозування зсувної небезпеки та оцінки впливу небезпечних процесів на інфраструктурні об'єкти. Оцінка та прогнозування зсувних процесів базується на створенні та аналізі комплексу фізико-геологічних та математичних моделей та передбачає два підходи. Перший ґрунтується на аналізі чинників формування зсувних процесів та їх регіональному прогнозуванні із застосуванням методів дистанційного зондування Землі, ГІС-аналізу та моделювання. Другий

підхід передбачає моніторинг та детерміноване моделювання зсувних процесів з метою локального прогнозування із залученням комплексу дистанційних, геофізичних методів та інфрачервоної термографії.

Комплексний інтегральний аналіз факторів зсувотворення дозволяє створити прогнозно-еталонну модель формування водно-гравітаційних явищ, що слугують основою для прогнозування зсувів на регіональному рівні. Методики побудови карт імовірності виникнення зсувів можуть бути використані для створення регіональних карт прогнозу небезпечних геологічних процесів. Методики локального прогнозування зсувної небезпеки на основі застосування раціонального комплексу геологічних, геофізичних, дистанційних, термографічних досліджень, а також детермінованого моделювання дозволяють виявити головні ознаки та визначити ділянки потенційного розвитку зсувних процесів у межах окремих зсувонебезпечних ділянок та запропонувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та уникнення їх негативної дії. Методичні розробки у вигляді розроблених ГІС-проектів, прогнозних карт поширення зсувних процесів та рекомендацій щодо мінімізації їх негативного впливу можуть бути запропоновані для використання державними та недержавними природоохоронними та екологічними організаціями, підприємствами геолого-геофізичного, геодезичного та будівельного профілю, а також військовими службами та органами місцевого самоврядування.

Подяки. Представлені дослідження виконувались у рамках держбюджетної НДР №21БП049-02 "Прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня та оцінка впливу на суспільство", Міжнародного наукового проекту "Протистояння зсувній небезпеці: суспільні виклики" (за підтримки Global Challenges Research Fund (GCRF)), програм PAUSE (фінансування урядом Французької Республіки) та JESH (фінансування академією наук Австрії). Автори висловлюють щире вдячність усім організаціям, що сприяли виконанню даних досліджень.

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Біліпов, П.В., Гожики, П.Ф., Кожем'якін, В.П. (2004). Активізація небезпечних геологічних явищ у Закарпатті як наслідок екстремальних паводків. К.: 210 с.
- Вижва, С., Онишук, В., Рева, М., Шабатура, О. (2020). Геофізичні дослідження зсувних територій правого берега річки Дніпро (Лісостепова зона). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(90), 17–20.
- Демчишин, М.Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины. Киев: Наук. думка, 256 с.
- Іванік, О.М., Шевчук, В.В., Лавренко, М.В. (2020). Моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування природно-техногенних систем. К.: ВПЦ "Київський університет", 351 с.
- Іванік, О.М. (2008). Просторовий аналіз та прогнозна оцінка формування водно-гравітаційних процесів на основі ГІС у Карпатському регіоні. *Геоінформатика*, 4, 52–58.
- Іванік, О., Шевчук, В., Кравченко, Д., Гадяцька, К. (2019). Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, впровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(86), 70–74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>
- Кошляков, О.Є., Ішук, О.О., Кризька, Н.М. (2003). Визначення потенційних зсувних ділянок правого схилу р. Дніпро в м. Києві за допомогою технології ГІС. *Матеріали IV Міжнар. конф. "Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища", 9–11 жовтня 2003 р.* К.: ВПЦ "Київський університет", 157 с.
- Кузьменко, Е.Д. (2016). Прогнозування зсувів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 601 с.
- Кузьменко, Е.Д., Безсмертний, А.Ф., Вдовина, О.П., Крив'юк, І.В., Чебан, В.Д., Шотгорн, Л.В. (2009). Дослідження зсувних процесів геофізичними методами. За ред. Е.Д. Кузьменка. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 294 с.
- Лисиченко, Г.В., Забулонов, Ю.Л., Хміль, Г.А. (2008). Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. К.: Наук. думка, 542 с.
- Шпак, В.І. (2020). Національна безпека України у викликах новітньої історії. К.: ДП "Експрес-об'ява", 468 с.

Хоменко, Р., Бондар, К., Попов, С. (2013). Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(61), 36–41.

Abbaszadeh Shahri, A., Maghsoudi Moud, F. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybridized block modular intelligence model. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 80(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/10064-020-01922-8>

Biswakarma, P., Barman, B.K., Joshi, V., Rao, K.S. (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

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

Daout, S., Parsons, B., Walker, R. (2021). Post-Earthquake Fold Growth Imaged in the Qaidam basin, China, With InSAR. *JGR: Solid Earth*, 126, e2020JB021241. <https://doi.org/10.1029/2020JB021241>

Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S.A., Manneback, P., Lebeau, F. (2020). Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring. *Procedia Computer Science*, 177, 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.066>

Foster, C., Pennington, C.V.L., Culshaw, M.G., 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., Ciampalini, A., Bardi, F. et al. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15, 183–197. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0875-y>

Frodella, W., Morelli, S., Gigli, G., Casaghi, N. (2014). Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum 3. 2–6 June*, Beijing, China, 06/2014.

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.

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.

Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 21(4), 423–448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>

Hung, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.

Ivanik, O. (2015). Principles and methods of the regional landslide hazard assessment based on analysis of the rock mass stress-strain state. *Proc. of the 14th EAGE International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412393>

Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52, 81–86. DOI: 10.24425/jwld.2021.139947

Ivanik, O., Menshov, O., Bondar, K., Vyzhva, S., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D., Tustanovska, L. (2022). Integrated approach to modelling and assessing the landslide hazards at the regional and local scale in Kyiv urbanized area, Ukraine. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5479–5491. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01447-x>

Ivanik, O., Shabatura, O., Hadiatska, K., Chernov, A., Kravchenko, D., Khomenko, R. (2020). Application of geophysical methods for monitoring of landslide hazards: case study from lake Glynka (Kyiv, Ukraine). *Proc. of the Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities, 8–11 September*. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055004>

Ivanik, O., Shabatura, O., Homenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2020). Local forecast of landslide hazards: case study from Kyiv region. *Proc. of the Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020*, Vol. 2020, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>

Khomenko, R.V., Bondar, K.M., Popov, S.A. (2013). The shallow multi-electrode device for electrical resistivity measurements. Description and test results. *Proc. of the 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142422>

Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software.

Ma, Z., Mei, G., Piccioli, F. (2021). Machine learning for landslides prevention: a survey. *Neural Comput & Applic*, 33, 10881–10907. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05529-8>

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681–696.

Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B.T., Lee, S., Melesse, A.M. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using Different GIS-Based Bivariate Models. *Water*, 11, 1402. <https://doi.org/10.3390/w11071402>

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.

Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 45, 653–681. doi:10.1046/j.1365-2478.1997.430277.x

Reynolds, J.M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 796 p.

- 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.
- Santoso, B., Hasanah, M.U., Setianto. (2019). Landslide investigation using self potential method and electrical resistivity tomography (Pasanggrahan, SouthSumedang, Indonesia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1–9. doi:10.1088/1755-1315/311/1/012068
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press, 522 p.
- Wei, Wu. (2015). Recent Advances in Modelling Landslides and Debris Flows. In: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer Intern. Publishing, IX, 323. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0>
- Whiteley, J.S., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., & Kendall, J.M. (2019). Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57, 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
- Abbaszadeh Shahri, A., Maghsoudi Moud, F. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybridized block modular intelligence model. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 80(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01922-8>
- Bagrii, I.D., Blipov, P.V., Gozhik, P.F., Kozhemyakin, V.P. (2004). Activation of hazard geological phenomena in Transcarpathia as result of extreme floods. Kiyv, 210 p. [in Ukrainian]
- Biswakarma, P., Barman, B.K., Joshi, V., Rao, K.S. (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
- Cees, J. Van Westen, (2000). The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. *Surveys in Geophysics*, 21, 2–3, 241–255.
- Daout, S., Parsons, B., Walker, R. (2021). Post-Earthquake Fold Growth Imaged in the Qaidam basin, China, With InSAR. *JGR: Solid Earth*, 126, e2020JB021241. <https://doi.org/10.1029/2020JB021241>
- Demchyshyn, M.G. (1992). Present slopes dynamics of Ukraine territory. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p. [in Ukrainian]
- Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S.A., Manneback, P., Lebeau, F. (2020). Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring. *Procedia Computer Science*, 177, 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.066>
- Foster, C., Pennington, C.V.L., Culshaw, M.G., 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., Ciampalini, A., Bardi, F. et al. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15, 183–197. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0875-y>
- Frodella, W., Morelli, S., Gigli, G., Casaghi, N. (2014). Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum 3*, 2–6 June, Beijing, China, 06/2014.
- 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.
- 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.
- Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 21(4), 423–448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Ivanik, O. (2015). Principles and methods of the regional landslide hazard assessment based on analysis of the rock mass stress-strain state. *Proc. of the 14th EAGE International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412393>
- Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52, 81–86. DOI: 10.24425/jwld.2021.139947
- Ivanik, O., Menshov, O., Bondar, K., Vyzhva, S., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D., Tustanovska, L. (2022). Integrated approach to modelling and assessing the landslide hazards at the regional and local scale in Kyiv urbanized area, Ukraine. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5479–5491. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01447-x>
- Ivanik, O., Shabatura, O., Hadiatska, K., Chernov, A., Kravchenko, D., Khomenko, R. (2020). Application of geophysical methods for monitoring of landslide hazards: case study from lake Glynka (Kyiv, Ukraine). *Proc. of the Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*, 8–11 September, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055004>
- Ivanik, O., Shabatura, O., Homenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2020). Local forecast of landslide hazards: case study from Kyiv region. *Proc. of the Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020*, Vol. 2020, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>
- Ivanik, O.M. (2008). Spatial analysis and prediction assessment of water and gravitation processes in the Carpathians region based on GIS. *Geoinformatics*, 4, 52–58. [in Ukrainian]
- Ivanik, O.M., Shevchuk, V.V., Lavrenyuk, M.V. (2020). Modelling of the influence of geological hazard processes on the functioning of natural and techno systems. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2019). National database of landslide processes: principles of development, implementation and application for landslides 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> [in Ukrainian]
- Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new low deep multi-electrode device for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (61), 36–41. [in Ukrainian]
- Khomenko, R.V., Bondar, K.M., Popov, S.A. (2013). The shallow multi-electrode device for electrical resistivity measurements. Description and test results. *Proc. of the 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142422>
- Koshlyakov, O.E., Ishchuk, O.O., Kryzyska, N.M. (2003). Determination of potential landslide areas of the right bank of the Dniro River in Kyiv by using GIS technology. *Proc. of the IV International Scientific Conference "Geophysical monitoring of Geological Hazard Processes and Ecological Condition of the Environment", October 9–11, Kyiv, Ukraine*. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, E.D. (Ed.), Bezsmertnyi, A.F., Vdovina, O.P., Kryvyuk, I.V., Cheban, V.D., Shtogrin, L.V. (2009). Study of landslide processes by geophysical methods. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, E.D., Blinov, P.V., Vdovina, O.P. et al. (Eds.). (2016). Prediction of landslides. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software.
- Lysyuchenko, G.V., Zabulonov, Yu.L., Khmil, G.A. (2008). Natural, man-made and environmental risks: analysis, assessment, management. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
- Ma, Z., Mei, G., Piccialli, F. (2021). Machine learning for landslides prevention: a survey. *Neural Comput. & Applic*, 33, 10881–10907. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05529-8>
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681–696.
- Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B.T., Lee, S., Melesse, A.M. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using Different GIS-Based Bivariate Models. *Water*, 11, 1402. <https://doi.org/10.3390/w11071402>
- 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.
- Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 45, 653–681. doi:10.1046/j.1365-2478.1997.430277.x
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 796.
- 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.
- Santoso, B., Hasanah, M.U., Setianto. (2019). Landslide investigation using self potential method and electrical resistivity tomography (Pasanggrahan, SouthSumedang, Indonesia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1–9. doi:10.1088/1755-1315/311/1/012068
- Shpak, V.I. (2020). *National security of Ukraine in the challenges of recent history*. Kyiv: DP "Express-Obiava". [in Ukrainian]
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press, 522 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. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (90), 17–20. [in Ukrainian]
- Wei, Wu. (2015). Recent Advances in Modelling Landslides and Debris Flows. In: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer Intern. Publishing, IX, 323. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0>
- Whiteley, J.S., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Kendall, J.M. (2019). Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57, 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 14.12.22

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: ivanik@knu.ua;
V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: svgeol44@gmail.com;
D. Kravchenko, PhD (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua;
K. Hadiatska, PhD (Geol.), Assist.,
E-mail: k.hadiatska@knu.ua;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

LANDSLIDE HAZARD PREDICTION AND IMPACT ON COMMUNITY: MAIN APPROACHES, PRINCIPLES AND METHODS

The problem of predicting the landslide hazard is a priority area of research in the field of assessment of risks and natural disasters, which requires a comprehensive in-depth analysis of the factors of landslide formation, as well as the synthesis of existed theoretical and empiric data for a full understanding of the problem of landslide hazard and comprehensive assessment of its impact on community. The presented research is aimed at the development, implementation, and application of a comprehensive methodology for predicting landslide hazards and assessing their impact on the infrastructure. The research was carried out within the framework of national and international projects with the participation of international partners from universities in France, Austria and Great Britain. The methodology of regional landslide hazard prediction for different structural regions of Ukraine is based on the methods of spatial modelling and aims at the landslide susceptibility mapping, creating multifactorial spatial models. As a result of a comprehensive analysis of landslide factors and spatial modelling integrated landslide hazard maps were created. These maps provide an opportunity to comprehensively assess the landslide hazard for different regions. Methods of local prediction of landslide hazard based on the application of a rational complex of geological, physical, remote, thermographic studies, and deterministic modelling enable to identify the main features and potential activity of landslide processes within landslide-prone areas and suggest preventive measures for risk mitigation. Examples of the integrated methodology applications for landslide hazard prediction within model sites in Kaniv and Kyiv regions are given. The concept of informing people about the potential geohazards was given.

Keywords: landslide hazard, slope stability, forecast, deterministic modelling.