

ОЦІНКА КАРСТОВОЇ НЕБЕЗПЕКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ ЯВОРІВ-ШКЛО

І.В. Ченурний

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 504576;

e-mail: gbg@nung.edu.ua

Статтю присвячено питанню оцінки небезпеки розвитку карстових провалів для карстонебезпечної території у зоні впливу розробки Яворівського родовища сірки. Обрана територія характеризується складними геологічними умовами, значним техногенним впливом та високою щільністю ураженості карстопроявами. Небезпека просторового розвитку карстових процесів оцінюється за розробленим алгоритмом, який передбачає врахування комплексного впливу різних чинників (геологічних, гідрогеологічних, геоморфологічних, тектонічних, геофізичних, техногенних), які ініціюють розвиток карстових провалів. Наголошено на важливості використання геоінформаційних технологій для створення просторових прогностичних моделей. Кількісні характеристики чинників визначено зі створених картографічних шарів із використанням методів просторового аналізу у геоінформаційних системах. З метою оцінки значущості та вибору оптимальної кількості чинників виконано їх статистичний аналіз, а саме, визначення статистичних законів розподілу чинників, матриць парних коефіцієнтів кореляції, кластерний та чинниковий аналіз та розраховано інтегральний показник розвитку карстопровальних процесів на досліджуваній території. На основі інтегрального показника виконано розрахунок ймовірності розвитку карстових процесів для усієї досліджуваної території. Результатом проведених досліджень є карта ймовірності розвитку провальнопросадкових проявів сульфатно-карбонатного карсту, створена у середовищі геоінформаційної системи. На карті відображено диференціацію ймовірності розвитку карсту з визначенням небезпечних ділянок, на яких рекомендуються детальні геофізичні дослідження, якщо такі ділянки пов'язані з ризиком для народногосподарських об'єктів і життєдіяльності людей.

Ключові слова: сульфатний та карбонатний карст, прогноз, геоінформаційні технології, чинник.

Статья посвящена вопросу опасности развития карстовых провалов для карстоопасной территории в зоне влияния разработки Яворовского месторождения серы. Выбранная территория характеризуется сложными геологическими условиями, значительным техногенным воздействием и высокой плотностью поражения карстопоявлениями. Опасность пространственного развития карстовых процессов оценивается по разработанному алгоритму, который предусматривает учет комплексного влияния различных факторов (геологических, гидрогеологических, геоморфологических, тектонических, геофизических, техногенных), инициирующих развитие карстовых провалов. Подчеркнута важность использования геоинформационных технологий для создания пространственных прогностических моделей. Количественные характеристики факторов определены из созданных картографических слоев с использованием методов пространственного анализа в геоинформационных системах. С целью оценки значимости и выбора оптимального числа факторов выполнен их статистический анализ, а именно определение статистических законов распределения факторов, матриц парных коэффициентов корреляции, кластерный и факторный анализ и рассчитан интегральный показатель развития карстопровальных процессов на исследуемой территории. По интегральному показателю выполнен расчет вероятности развития карстовых процессов для всей исследуемой территории. Результатом проведенных исследований является карта вероятности развития провально-просадочных проявлений сульфатно-карбонатного карста, созданная в среде геоинформационной системы. На карте представлена дифференциация вероятности развития карста с определением опасных участков, на которых рекомендуются детальные геофизические исследования, если такие участки связаны с риском для народнохозяйственных объектов и жизнедеятельности людей.

Ключевые слова: сульфатный и карбонатный карст, прогноз, геоинформационные технологии, фактор.

The article is devoted to assessing the risk of failure to karst area in the zone of influence of the development Javoriv sulfur deposits. The selected area is characterized by complex geological conditions, significant technological impact and high density infestation karst failures. Risk of spatial development of karst processes is evaluated on the basis of the algorithm, which takes into consideration the combined effect of various factors (geological, hydrological, geomorphological, tectonic, geophysical, and technological) that trigger the development of karst failures. The importance of using GIS technology to create spatial predictive models is emphasized. Quantitative characteristics factors identified from map layers created using methods of spatial analysis in geographic information systems. In order to assess the importance of factors and optimal choice among them carried out a statistical analysis of selected factors, namely the determination of statistical laws of distribution factor matrix pair correlation coefficients, cluster and factor analysis and calculated integral indicator of karst failures processes in the investigated area. Based on the integrated parameter performed the calculation of probability of karst processes for the entire study area. The result of the research is to map the probability of failure breeds manifestations sulfate-carbonate karst created among geographic information system. The map presented differentiation likelihood of karst definition of hazardous areas where detailed geophysical surveys are recommended if such areas related to risk for economic projects and livelihoods.

Keywords: sulfate and carbonate karst, prognosis, geoinformation technology, factor.

Вступ

Сучасні кліматичні зміни та незбалансована господарська діяльність призводять до активного розвитку екзогенних геологічних процесів (ЕГП) до яких відносять зсуви, карст, підтоплення, селі. Карст є особливо небезпечним видом ЕГП, оскільки його раптова активізація спричиняє виникнення миттєвих провалів або осідань земної поверхні. Причини розвитку карсту – це передусім вплив від природних умов (геологічна будова території) та видобування корисних копалин. Поширення поверхневих та підземних карстопроявів спостерігається майже по всій території України, а їх кількість перевищує 27 тисяч одиниць. Найбільш ураженими карстовими процесами є такі території: Автономна республіка Крим (9594 карстопрояви), Львівська (6779), Тернопільська (1371), Чернігівська (2313), Івано-Франківська (2096), Волинська (1529), Хмельницька (769) областей [1]. Деформації, що виникають у зв'язку з господарським освоєнням закарстованих територій, супроводжуються руйнуванням будівель і споруд, розривами підземних комунікаційних мереж, ускладненням в експлуатації гірничих виробок, втратами водних ресурсів із водосховищ і каналів, зменшенням площ орних земель тощо, тому визначення ступеня карстопровальної небезпеки в межах карстонебезпечних територій є актуальною задачею.

Одним із напрямків просторово-часового регіонального прогнозування екзогенних геологічних процесів і карстових явищ зокрема є прогнозування, засноване на обліку впливу на їхній розвиток природних і антропогенних просторових і часових чинників. Геоінформаційні системи є основним інструментом, який використовується для роботи із масивами просторових даних, поєднуючи в собі можливості систем управління базами даних, графічних редакторів та аналітичних засобів і цим самим їх застосування як середовища реалізації прогностичних моделей є доцільним.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Дослідженням екзогенних геологічних процесів і карстових процесів зокрема приділяється значна увага, про це свідчить велика кількість публікацій, серед яких варто відмітити роботи вітчизняних науковців: О.М. Адаменка, В.Н. Андрейчука, А.М. Гайдіна, С.В. Гошовського, О.Б. Климчука, Г.І. Рудька та інших. Фундаментальними працями, в яких широко висвітлено проблему карсту як геологічного явища, є роботи Д.С. Соколова, Г.А. Максимовича, Н.А. Гвоздецького. Спроби розробки методики прогнозування карстових процесів були зроблені в роботах [2-4]. В них наводиться опис прогнозу ЕГП, але стосовно карстових процесів є тільки декларація загальних схем, що не знайшла застосування. Основним підходом до картування ступеня небезпеки території від поширення певного виду ЕГП є розрахунок

ураженості територіальної одиниці, тобто районування за комплексом певних природних умов розвитку. На сучасному етапі виокремився напрямок у картографуванні ЕГП, чому значною мірою посприяв розвиток ГІС-технологій, який передбачає визначення карстопровальної небезпеки за чинниками, які ініціюють карстовий процес. Сюди можна віднести праці [5, 6, 7].

Автор брав участь у роботах з розроблення алгоритму прогнозування карстопровальних процесів, який було застосовано для території Передкарпаття в межах Львівської області. Було створено прогностичну карту та довгостроковий часовий прогноз карстонебезпеки [8, 9]. В основу цих робіт було покладено каталог карстопроявів ДНВП «Геоінформ України», який складено відповідно до масштабу 1:200000-1:500000. У попередніх дослідженнях основна увага була спрямована на визначення закономірностей просторово-часового розвитку карстових процесів на регіональному рівні, і оскільки до уваги бралась часова складова, то основна увага приділялась природним чинникам розвитку карсту. Дослідження наведені в даній статті повинні вирішити невирішену раніше проблему, а саме оцінка карстової небезпеки на основі детального каталогу карстопроявів середньомасштабного рівня в межах карстонебезпечної території, де визначальну роль у активізації карсту відіграють техногенні чинники.

Задачі та методи досліджень

Метою дослідження, результати якого наводяться в цій статті, є апробація розробленої методики оцінки просторової карстової небезпеки для середнього масштабу, використовуючи детальний каталог розвитку карстових процесів, у межах території дії видобувних підприємств. Також продемонструвати можливості ГІС при аналізі просторових умов поширення карстових процесів та при складанні карт карстової небезпеки.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі завдання:

- обрати та обґрунтувати вибір просторових чинників утворення проявів сульфатно-карбонатного карсту та визначити закономірності їх розподілу;
- методами просторового аналізу ГІС, використовуючи відповідні картографічні шари, визнати кількісні характеристики просторових чинників поширення карсту;
- методами математичної статистики оцінити значущість кожного чинника та виключити їх взаємовплив;
- визначити інтегральний параметр карстопровальної небезпеки на кількісному ймовірнісному рівні;
- використовуючи методи тематичного картографування в ГІС побудувати оцінити ступінь карстової небезпеки на досліджуваній території шляхом побудови карти ймовірності розвитку поверхневих проявів сульфатного і карбонатного карсту.

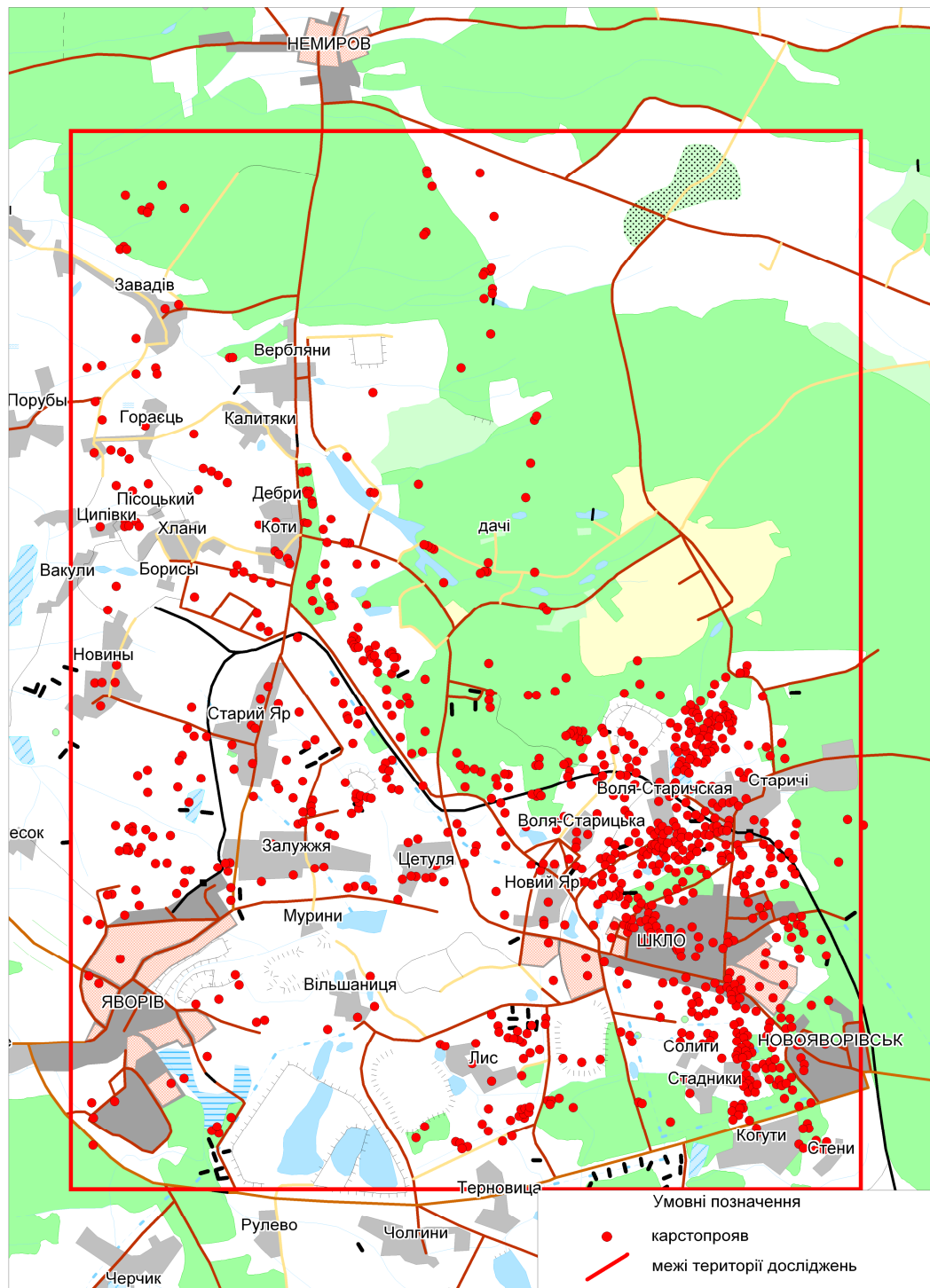


Рисунок 1 – Схема території досліджень

Алгоритм створення карт карстової небезпеки на основі врахування комплексу просторових чинників наведено в [8]. Він зводиться до одержання просторового еталонного інтегрального показника розвитку карстопровальних явищ, який розраховується на основі урахування всіх можливих просторових чинників розвитку карстових процесів. Однією з основних проблем є відбір із великої кількості ініціуючих чинників найбільш інформативних, для яких виключається взаємовплив. Це досягається шляхом послідовного застосування методів математичної статистики.

Основний матеріал дослідження

Для досліджень розвитку карстопровальних процесів обрано ділянку розміром 15×20 км на території Львівської області, у межах якої, за даними Львівської геологорозвідувальної експедиції ДП «Західукргеологія», зареєстровано 890 карстопровявів (карстових ліюк) (рис. 1).

Дана територія характеризується інтенсивним розвитком сульфатно-карбонатного карсту. Зокрема майже всі карстопрояви на даній території можна віднести до техногенно активізованих.

Основні закономірності розвитку карсту пов'язані з літологічним складом порід, просторовим їх розповсюдженням і потужністю покривних порід, ступенем і умовами водопроникності, умовами взаємодії поверхневих і підземних вод з породами, що карстуються, а також з антропогенним чинником.

Досліджувана територія розташована в межах крупних геоструктурних регіонів – Східно-Європейської платформи та Передкарпатського прогину. Горизонт гіпсангідритів, разом із залягаючими в його покрівлі пелітоморфними та кристалічними вапняками, утворює тираску світу, яка є основним середовищем розвитку карсту даної території. Територія досліджень має складну геологічну будову. Це, в першу чергу, наявність великої кількості тектонічних порушень, що значно сприяє карстоутворенню, враховуючи їхню дренажну дію, а також підвищену тріщинуватість порід у прилягаючих до розломів ділянках. Іншою специфічною особливістю є складність розділення дністровського (гіпсангідритового) і ратинського (надгіпсового) горизонтів тираської світи.

У гідрогеологічному відношенні досліджувана територія належить до Волино-Подільського артезіанського басейну платформного типу та Передкарпатського артезіанського басейну. Для артезіанського басейну в загальному характерне поширення карстово-тріщинних колекторів з локальним розвитком послідовно залягаючих водоносних горизонтів і комплексів. Відклади косівської свити й сармату (глинисті відклади), утворюють слабопроникну товщу, що розділяє водоносні комплекси четвертинних і міоценових відкладів.

Перші і найбільші провалля, що виникли в результаті відкритої відробки сірчанних руд, з'явилися у долині р. Шкло в районі санаторію. Надалі цей процес активізувався на північний і південний схід у долинах рік. Терешка, Гноєнець. Захоплення нових територій супроводжувалося розчиненням в їх межах порід і насиченням підземних вод, що зменшувало їх подальшу агресивність і сприяло тимчасовій стабілізації провалоутворень. Польові обстеження дали підстави поділити карстові форми рельєфу за розміром, генезисом і відносним віком на лійки, карстово-ерозійні западини та карстові поля. Лійки утворюються в результаті карстово-обвальних, карстово-ерозійних та змішаних проваль і просідання землі. В плані вони переважно чашо- і блюдцеподібні, рідше - конусоподібні (на початковій стадії розвитку) [10]. Ураженість карстом досліджуваної території залежить від потужності порід, що карстуються, та їх глибини залягання; потужності та типу покривних порід (якщо більше 70 м - карстові лійки виявляються в поодиноких випадках у місцях переважання в розрізі піщаних відкладів). Карстові форми на території Язівського родовища поширені дуже нерівномірно. Вони сконцентровані в основному в східній і південно-східній частинах території, де в межиріччі Шкло і Терешка на невеликій ділянці кількість карстових лійок на 1 км² досягає більше 100. У

середньому концентрація лійок становить 10-20 на км². Карстові провали, як правило, мають невеликі розміри, здебільшого 5-6 м (максимум 20-30 м) в діаметрі і до 2 м (максимум 5-10 м) глибини [10]. Простежується закономірне збільшення кількості і зменшення діаметрів лійок на ділянках з меншою потужністю відкладів, що залягають над товщею, яка карстуеться. При великих потужностях порід кривлі формуються крупні провалля. Частина карстово-ерозійних западин, карстових лійок і проваль утворилася до початку розробки Язівського сірчаного родовища. У зв'язку з водопонижувальними роботами на Язівському кар'єрі процес провалоутворення активізувався. Вздовж долин рік Шкло, Терешка, Пила, Гноєнець, Хомечки виникли десятки і сотні карстових проваль та поля карстових лійок; більше двох десятків в різних місцях с. Шкло, декілька проваль на території курорту Шкло внаслідок приуроченості зони до тектонічних порушень і тріщинуватості. Вивчена залежність утворення карстових лійок від величини водовідливу із кар'єру і кількості атмосферних опадів. Максимальна кількість карстових лійок утворилася в 1979, 1982 і 1985 рр., коли ці чинники були в максимумі. Послаблення і активізація карстопровальності в 1978-1982 роках (27-48 лійок на рік) свідчать про вибірковість техногенного карсту. За станом на 1986 рік більше половини території Язівського сірчаного родовища можна вважати нестабільною із значним і дуже значним інженерно-геологічним ризиком, в долинах р.Шкло (на північ від селища Шкло), р.Терешки, на території водосховища Новий Яр ситуація критична і катастрофічна. З початком 90- років, у зв'язку із зупиненням експлуатації сірчаного родовища сірки, ситуація із розвитком карстових процесів дещо міняється в сторону стабілізації. Північ від Язівського кар'єру кількість карстових лійок явно зменшилась, це можна пояснити тим, що частина старих карстових лійок була рекультивована, а внаслідок зменшення глибини візру рік нові лійки ще не утворились. Польовими обстеженнями, виконаними в період літніх і осінніх злив 1999-2001 рр. зафіксовано свіжі деформації земної поверхні в долинах рік Шкло, Терешка, Пила, водосховищі Новий Яр, на території курорту Шкло [10]. Дослідження дозволили встановити тісний зв'язок між об'ємом атмосферних опадів, водовідливом і кількістю утворених провальних та інших за генезисом поверхневих карстових форм [10].

Активізація карстових процесів найбільш характерна для тектонічно роздробленої зони зчленування платформи з прогином, а також при порушенні гідродинамічного режиму. Найбільшу небезпеку представляють ділянки впливу крупних гірничодобувних підприємств, промислового і цивільного будівництва, де не врахована специфіка карстового процесу. У зоні впливу Язівського кар'єру найбільш закарстовані долини рік Шкло, Терешка та хвостосховище.

Для забезпечення всестороннього розгляду процесу утворення карстових проваль на досліджуваній ділянці розглядалась максимальна

доступна кількість чинників. Виходячи з теоретичних уявлень про процес утворення карстових провалів, а також з об'єктивності впливу чинників у регіональному масштабі, у середовищі ГІС Mapinfo визначено кількісні характеристики в точках карстопроявів для наступних ймовірних чинників карстоутворення:

- геологічні – літологічний склад четвертинних відкладів, геологія дочетвертинних відкладів, відстань до тектонічного порушення;

- геофізичні – значення гравітаційного поля в редукції Буге;

- геоморфологічні – абсолютна висота над рівнем моря точки карстопрояву, відстань до базису ерозії;

- гідрогеологічні - рівень ґрунтових вод, водопровідність четвертинних відкладів, водопровідність неогенових відкладів, глибина водоупорів у товщі четвертинних відкладів, наявність і тип першого від поверхні водоупору, потужність порід до першого від поверхні водоупору, значення гідроізогіпс четвертинного та міоценового водоносного горизонту, ізопотужності четвертинного та міоценового водоносних горизонтів, катіонний, аніонний склад і мінералізація підземних вод четвертинного водоносного горизонту;

- інженерно-геологічні – відстань до найближчого карстопрояву;

- техногенні – відстань до ділянок порушення геологічного середовища (кар'єрів, водозаборів), відстань до населеного пункту, відстань до доріг.

Геологічна будова території, літологічний склад порід геологічного розрізу є головними чинниками, що визначають ураженість території карстовими процесами, оскільки карст являється геологічним процесом, розвиток якого строго пов'язаний із районами поширення розчинних гірських порід.

Оскільки метою даної роботи є прогнозування провальнопросадкових проявів карсту, важливо також урахувати в якості ініціюючих чинників літологічний склад, потужність четвертинних відкладів і перекриваючих порід. Наявність у розрізі четвертинних відкладів із високими значеннями водопровідності (пісків, супісєй тощо) призводить до швидкої інфільтрації води і прискорює розвиток карсту. Потужність товщі перекриваючих порід є чи не головним чинником, що контролює поверхневий прояв карсту.

Вплив тектонічних порушень на розвиток карстового процесу проявляється передусім у їхній дренажній дії. Розломи створюють умови для інтенсивного руху вод між водоносними горизонтами, тим самим збільшуючи швидкість розчинення карстових порід.

Наступною групою чинників, що суттєво впливають на перебіг карстових процесів, є гідрогеологічні чинники. Цими чинниками визначаються здебільшого швидкість розчинення карстових порід, обводненість, швидкість фільтрації підземних вод, агресивність підземних вод по відношенню до порід, що карстуються.

До геоморфологічних чинників можна віднести абсолютну висоту над рівнем моря точки карстопрояву, відстань до базису ерозії (ріки). З цих чинників слід відмітити суттєвий вплив річкових долин на перебіг карстових процесів, що пов'язано з різними гідродинамічними умовами в залежності від розташування карстових зон відносно рівня базису ерозії.

У даний час чи не найсуттєвіше на активізацію карстопровальних явищ впливають техногенні чинники. Сюди відноситься порушення геологічного середовища гірничими кар'єрами, шахтами, водозаборами.

Для розрахунку числових характеристик чинників для точок карстопроявів використовувався картографічний матеріал, який за необхідності переводився засобами векторизації в цифровий формат ГІС Mapinfo.

Для попереднього статистичного аналізу обраних чинників утворення провальнопросадкових проявів карсту взято 23 чинники характеристики: відстань до тектонічного порушення, R_i геологічних свит (горизонтів); R_i зон по літології четвертинних відкладів; гравітаційне поле в редукції Буге; абсолютна висота над рівнем моря точки карстопрояву; відстань до базису ерозії; рівень ґрунтових вод; R_i зон з різним катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту; R_i зон з різним аніонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту; R_i зон з різним мінералізацією підземних вод четвертинного водоносного горизонту; водопровідність четвертинних відкладів; водопровідність неогенових відкладів; R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів; R_i зон типу першого від поверхні водоупору; потужність першого від поверхні водоупору; потужність порід до першого від поверхні водоупору; гідроізогіпси четвертинного водоносного горизонту; гідроізогіпси міоценового водоносного горизонту; потужність четвертинного водоносного горизонту; потужність міоценового водоносного горизонту; відстань до населеного пункту; відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів); відстань до найближчого карстопрояву. Позначення R_i означає, що карти, з яких знімались значення характеристик чинників, побудовані за принципом районування, і для них розраховувався коефіцієнт контрастності згідно з формулою [11].

Процедури, які будуть виконуватися далі, повинні забезпечити участь у розрахунку інтегрального показника карстопровальної небезпеки лише тих чинників, що закономірно пов'язані з механізмом утворення поверхневих карстопроявів і є відносно незалежними один щодо іншого. Відбраковування чинників буде здійснюватись у такій послідовності: 1) побудовою законів розподілу параметрів з перевіркою їх на відповідність нормальному закону розподілу, або закону розподілу, що містить експоненту (тобто приводиться до нормального закону розподілу логарифмуванням); 2) кластерним аналізом; 3) аналізом чинників; 4) аналізом матриці коефіцієнтів кореляції.

Таблиця 1 – Просторові чинники утворення карстових проваль

№ з/п	Група чинників	Чинник	Кількісний показник чинника (характеристика чинника)	Визначений закон розподілу
1	Геологічні	Поширення геологічних горизонтів	Коефіцієнт ураженості геологічної світи (горизонта)	Параметр R_i
2	Геологічні	Літологічний склад четвертинних відкладів	Коефіцієнт ураженості зон із різним літологічним складом четвертинних відкладень	Параметр R_i
3	Геоморфологічні	Базис ерозії	Відстань до ріки	Вейбула
4	Геоморфологічні	Найближчий поверхневий прояв карсту	Відстань до найближчого карстопрояву	Логнормальний
5	Гідрогеологічні	Водопровідність неогенових відкладень	Значення водопровідності неогенових відкладень	Вейбула
6	Гідрогеологічні	Поширення водоупорів	Потужність першого від поверхні водоупору	Нормальний
7	Гідрогеологічні	Четвертинний водоносний горизонт	Потужність четвертинного водоносного горизонту	Екстремальний
8	Гідрогеологічні	Поширення водоупорів	Коефіцієнт ураженості зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів	Параметр R_i
9	Гідрогеологічні	Глибина рівня підземних вод	Глибина залягання рівня міоценового водоносного горизонту	Нормальний
10	Тектонічні	Тектонічні порушення	Відстань до тектонічного розлому	Вейбула
11	Гідрогеологічні	Грунтові води	Рівень ґрунтових вод	Вейбула
12	Геофізичні	Гравітаційне поле	Значення гравітаційного поля в редукції Буге	Нормальний
13	Техногенні	Наявність населених пунктів	Відстань до населеного пункту	Екстремальний
14	Техногенні	Наявність ділянок порушення геологічного середовища	Відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів)	Екстремальний
15	Техногенні	Наявність автодоріг, залізниць	Відстань до дороги	Вейбула
16	Гідрогеологічні	Хімічний склад підземних вод	Коефіцієнт ураженості зон з різним катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту	Параметр R_i

Проведений аналіз дозволив вилучити з подальших досліджень ряд чинників. Зокрема, чинник «водопровідність четвертинних відкладів», який не відповідає нормальному закону розподілу. Наближені чинники «гідроізогіпси міоценового водоносного горизонту - абсолютна висота над рівнем моря» було замінено їхньою різницею. Цей крок зроблено на підставі розгляду геологічної будови території. Водовмісними породами міоценового водоносного горизонту є породи, що карстуються: літоамнієві і ратинські вапняки та гіпсоангідрити. Отже, різниця між вказаними чинниками частково врахує глибину залягання карстових порід. У подальшому цей чинник називатимемо глибиною залягання міоценового водоносного горизонту. Також було прийнято рішення про вилучення чинника R_i зон типу першого від поверхні водоупору через подібність з чинником R_i геологічних світ (горизонтів), яку видно з дендрограми. Крім того, ці чинники є близькими і за фізичним змістом.

Чинники « R_i зон з різним катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту – R_i зон з різним аніонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту – R_i зон з різним мінералізацією підземних вод четвертинного водоносного горизонту» є теж дублюючими. Було прийнято рішення вилучити чинники R_i зон з різним аніонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту, R_i зон з різним мінералізацією підземних вод четвертинного водоносного горизонту, залишити для прогностичної моделі чинник R_i зон з різним катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту, оскільки він має найкращу градацію.

Отже, в результаті попереднього розгляду ймовірних чинників карстоутворення, розрахованих у 890 точках поверхневих карстових проявів, для досліджень відібрано 16 основних параметрів. Наведений у табл. 1 перелік просторових чинників обраний із наступних міркувань: забезпечене представництво всіх груп

чинників; чинники виключають одночасний вплив один на одного; чинники є об'єктивними, відповідають регіональному рівню та є загальнодоступними для користувача; кількісні показники кожного з чинників стосовно активності утворення карстових форм змінюється закономірно.

Далі наведено обґрунтування істотності впливу окремих просторових чинників на процеси поверхневого карстоутворення.

Поширення геологічних свит. Вплив цього чинника пояснюється виходячи з основних чотирьох умов утворення карсту - присутність у розрізі порід, здатних карстуватись.

Літологічний склад четвертинних утворень. Четвертинні утворення відіграють роль покривних порід. Їхня роль чітко виступає насамперед у регулюванні інфільтрації атмосферних вод, у першу чергу має значення літологічний склад і потужність цих відкладів, які контролюють надходження агресивних атмосферних вод до карстових порід, а так само характеризують їхню стійкість.

Базис ерозії. Вплив цього чинника варто пов'язувати, насамперед, із дренажним ефектом річкових долин. Можна назвати декілька причин збільшення карстових проявів поблизу річкової долини. Перша - розкриття тріщин у придолинних ділянках за рахунок розвантаження підземних вод, друга - зосередження фільтраційних потоків підземних вод поблизу річкової долини й збільшення швидкості руху карстових вод. У свою чергу, збільшення швидкості фільтрації водного потоку збільшує швидкість вилуговування карстових порід, це показано на прикладі вилуговування гіпсу. Завдяки спільній дії цих причин закарстованість придолинних ділянок часто вища в порівнянні з ядрами вододільних масивів.

Найближчий поверхневий прояв карсту. Наявність цього чинника обумовлена особливістю прояву поверхневого карсту даної території, переважна більшість карстових лійок розподілені із щільністю значно більшою 1 карстопрояву на 1 км².

Водопровідність неогенових відкладів. Даний чинник характеризує другу із чотирьох основних умов розвитку карсту - наявність водопроникності карстових порід. Підвищена вогнистість комплексу неогенових порід території прогнозу, до яких відносяться породи, що карстуються, дає можливість інтенсивної фільтрації підземних вод. Детальніше про геологічний і гідрогеологічний стан району було написано вище.

Поширення першого від поверхні водопору. Для більшої частини території – це косівські глини, що покривають карстові породи, тому очевидно, що зменшення потужності глини буде сприяти появі карстового провалу.

Потужність четвертинного водоносного горизонту. Знижена ізопотужність четвертинного водоносного горизонту за наявності карстових порід свідчить про можливу низхідну фільтрацію вод зони аерації, причиною чого може бути зниження напору карстових вод

унаслідок дренажної дії ріки, розламу, водозабору, кар'єру й т.д.

Глибина залягання рівня міоценового водоносного горизонту. Цей чинник безпосередньо вказує на можливість виникнення карстового провалля. Він розрахований нами як різниця між абсолютними позначками рельєфу денної поверхні та гідроізогіпсами міоценового водоносного горизонту (середовища карстоутворення). Частково цей чинник характеризує глибину залягання карстових порід. Чим більша глибина залягання порід, що карстуються, тим менша кількість поверхневого карсту. При різкому зануренні міоценового горизонту в умовах прогину або його відсутності чинник виконує роль заперечуючого.

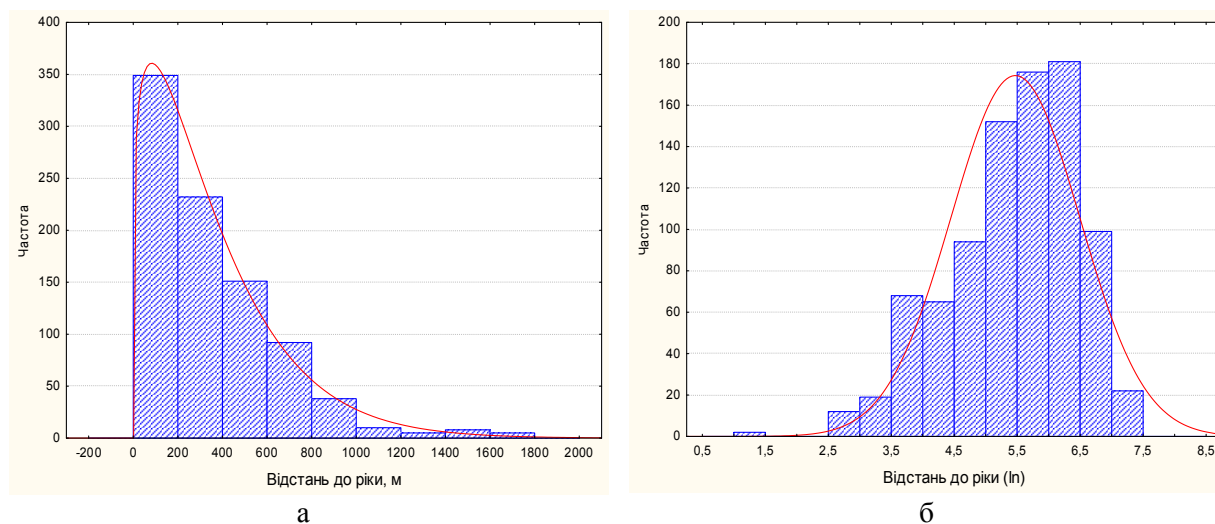
Відстань до тектонічного порушення. Вплив тектонічних розломів пов'язують, насамперед, із тріщинуватістю порід у зоні розлому, а також із дренажним впливом тектонічних розломів. Причому для даної території характерним є висхідний рух підземних вод по тектонічних розломах.

Гравітаційне поле в редукції Буге. Значення гравітаційного поля в редукції Буге знімалося з карт аномалій гравітаційного поля. Метод гравіметрії використовується для моніторингу карстових процесів, у такий спосіб аномалії гравітаційного поля можна зв'язувати з карстовими процесами. Від'ємні аномалії є наслідком дефіциту щільності гірських порід в умовах закарстованості.

Наявність ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів), населених пунктів, доріг може бути однією з основних причин катастрофічного розвитку поверхневого карсту внаслідок їхнього негативного впливу на гідрогеологічні умови, зокрема на збільшення швидкості руху підземних вод унаслідок їх інтенсивного відкачування, що призводить до прискореного карстоутворення.

Аніонно-катионний склад і мінералізація карстових вод значно впливає на перебіг карстового процесу: цей чинник повинен би враховувати в прогнозі одну з основних умов утворення карсту – розчинюючу здатність вод. Хоча розглядався хімічний склад не карстових вод (міоценового водоносного горизонту), а четвертинного водоносного горизонту, отримані результати підтверджують закономірності, описані в класичній літературі по карсту. Щодо значень коефіцієнта контрастності для зон з різними аніонними і катионними типами вод, то варто відмітити, що найбільш ураженими карстом є зони гідрокарбонатного та кальцієвого типу. Це можна частково пояснити теорією низхідної фільтрації вод підгіпсового горизонту через товщу гіпсангідритів та ратинських вапняків, розчиняючи їх, води насичуються гідрокарбонат- і сульфатіонами та іонами кальцію.

Для кожного параметра визначено закон розподілу (таблиця 1). За алгоритмом [8], наступним обов'язковим етапом є перетворення значень характеристик чинників таким чином, щоб розподіли ймовірностей перетворених величин відповідали нормальному теоретичному



а - гістограма розподілу абсолютних величин,
б - гістограма розподілу ряду логарифмів з нормалізацією

Рисунок 2 – Гістограми розподілів абсолютних значень і логарифмів характеристики чинника «відстань до ріки» і їхні теоретичні аналоги

закону. Це досягається процедурою логарифмування. На рисунку 2 як приклад наведено гістограму розподілу характеристики чинника «відстань до ріки» до та після логарифмування і нормалізації. Як видно з рисунку 2а, розподіли значень характеристик чинника після процедури логарифмування досить точно описуються диференціальними кривими нормального закону розподілу. На рисунку 3 наведено карту зміни цієї характеристики по площі.

Для окремих геологічних світ (горизонтів) і зон різного літологічного складу четвертинних відкладів, зон відмінних за катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту та зон з різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів розраховано "коефіцієнт контрастності" (або – "коефіцієнт ураженості території"). Наведений показник характеризує ступінь ураженості провальнопросадковими проявами конкретної території. Завдяки кількісному показнику – коефіцієнту контрастності з'явилася можливість ранжування окремих зон за ступенем ураженості й розрахунку для конкретного параметра значення функції ймовірності ураженості карстом у конкретній точці території. Приміром, у таблиці 2 та на рисунку 4 наведено результати розрахунків коефіцієнта контрастності для різних геологічних світ (горизонтів).

Важливим етапом статистичного аналізу є виявлення "дублюючих" чинників з метою зменшення числа останніх. На попередньому етапі досліджень нами вилучено дублюючі чинники. Для обраних параметрів було додатково проведено аналіз на наявність чинників із взаємовпливом.

Розрахунок парних коефіцієнтів кореляції між параметрами карстоутворення виявив декілька пар чинників із високими значеннями коефіцієнтів, що може свідчити про тісний причинно-наслідковий зв'язок між окремими парами параметрів. Але, з теорії множинної

кореляції, наявність істотних значень парного коефіцієнта кореляції між випадковими величинами може бути пояснено впливом схованих інших чинників; компенсація такого впливу може помітно понизити реальний зв'язок між досліджуваною парою параметрів.

На рис. 5 наведена дендрограма евклідових відстаней між окремими чинниками, побудована за результатами кластерного аналізу. На дендрограмі окремі параметри позначені як L_n , що є свідченням того, що при аналізі використовувалися логарифми зазначених величин. Побудована дендрограма дозволила виявити дві групи чинникових характеристик «Водопровідність неогенових відкладів – R_i геологічних світ – R_i », «Відстань до кар'єрів, водозаборів – Потужність четвертинного водоносного горизонту», які більш тісно порівняно з іншими пов'язані між собою. Зазвичай в такій ситуації у ході подальших досліджень (наприклад, при розрахунку комплексного результуючого показника) групи взаємозалежних чинників змінюють на один з них. Однак, додатковий аналіз групи чинників за допомогою чинникового аналізу методом головних компонентів засвідчив про відсутність такого зв'язку.

Таким чином, метою кластерного й чинникового аналізів у нашому випадку є, по-перше, підтвердження значущості чинників, по-друге, встановлення й виключення дублюючих чинників, і, по-третє, групування. Результати свідчать про істотну розбіжність різних параметрів і загалом про різнопланові внески досліджуваних чинникових характеристик у сумарну дисперсію ознак.

Окремим етапом досліджень є оцінка внеску (коефіцієнта інформативності) окремих чинників у процес утворення карстових провалів. У табл. 3 наведено результати розрахунків оцінки ступеня інформативності кожного з чинників (або вагових коефіцієнтів) у відсотках щодо всіх розглянутих змінних.

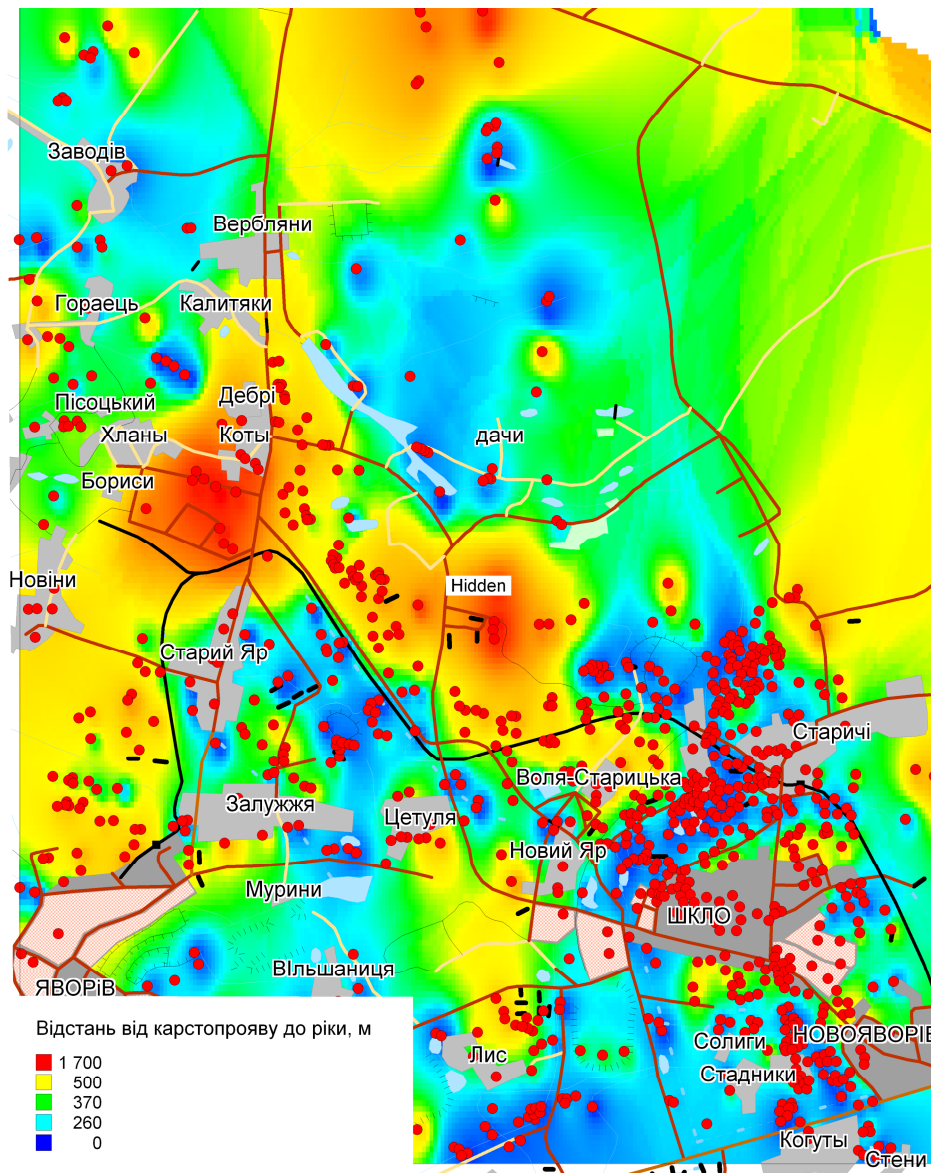


Рисунок 3 – Карта зміни характеристики чинника «відстань до ріки», виміряна в кожній точці карстопрояву

Таблиця 2 – Ранжування геологічних світів за величиною коефіцієнта контрастності R_i для території досліджень

Ранговий номер зони	Назва геологічної світи, горизонту	Літологічний склад	Площа, км ²	Кількість карстопроявів	R_i
1	Вербовецькі шари	Глини сірі з прошарками глин, бентонітових туфітів, пісковики (немирівські)	631200,536	5	2,67
2	Косівська світа	Глини сірі, темно-сірі із прошарками пісковиків, пісків, алевролітів, туфітів	107920360,5	545	1,702
3	Ратинські шари	Вапняки хомогенні	392575,623	1	0,858
4	Волинський горизонт	Глини сірі із прошарками пісковиків і пісків	108009279,4	245	0,764
5	Дністровський горизонт	Гіпси, ангідрити, вапняки вторинні сірконосні й несірконосні	4157477,061	7	0,567
6	Верхнедашавська підсвіта	Глини сірі, щільні, вапняковисті	38984813,49	65	0,562
7	Нараєвські шари	Вапняки органогенні з литотамніями	39902279,74	22	0,186

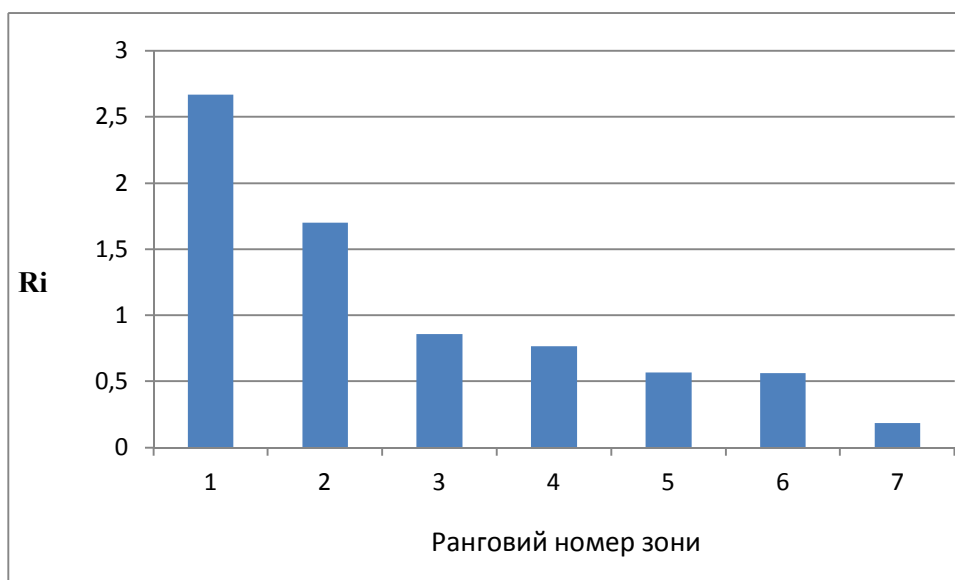


Рисунок 4 – Ранжування геологічних світ за величиною коефіцієнта контрастності R_i для території досліджень

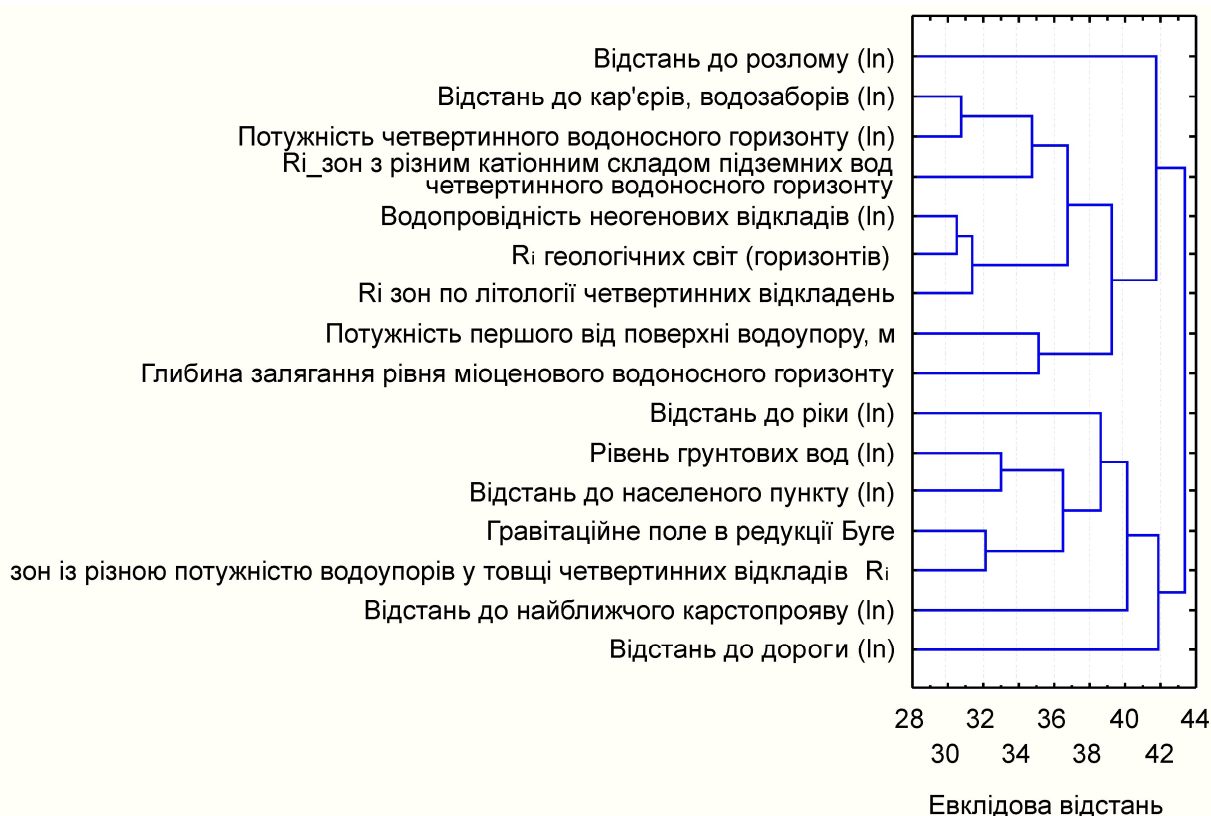


Рисунок 5 - Дендрограма зв'язків між групами характеристик чинника за результатами кластерного аналізу способом зваженого парного осереднення

Наступним важливим етапом є розрахунок інтегрального показника, закономірно пов'язаного з просторовим розподілом проявів карсту. Він проводиться після визначення статистичних характеристик відповідних розподілів кожного чинника й виконання процедури нормалізації по кожному з них, у результаті якої одержуємо нормалізоване значення характеристики чинника P_{ij} , де i - номер точки спостереження, j - номер характеристики чинника.

Розподіл, представлений на рис. 6, із високим ступенем вірогідності відповідає нормальному теоретичному розподілу ймовірності нормалізованих значень випадкової величини (D-критерій Колмогорова-Смірнова = 0,05). Після цього проводиться перерахунок значень інтегрального показника в ймовірність згідно з алгоритмом прогнозування розвитку ЕГП.

Очевидно, що оптимальні умови для утворення карстових проваль настать тоді, коли значення ймовірності розподілу комплексного

Таблиця 3 – Результати розрахунків інформативності для прийнятих чинників

Характеристика чинника	Ваговий коефіцієнт інформативності в розрахунках, %
Відстань до розлому (ln)	3,17
Відстань до ріки (ln)	4,54
Відстань до кар'єрів, водозаборів (ln)	5,59
Відстань до дороги (ln)	3,22
Рівень ґрунтових вод (ln)	6,32
Потужність першого від поверхні водоупору, м	6,00
Водопровідність неогенових відкладів (ln)	9,04
Ri зон по літології четвертинних відкладень	8,42
Відстань до населеного пункту (ln)	8,43
Гравітаційне поле в редукції Буге	8,80
Ri зон з різним катіонним складом підземних вод четвертинного водоносного горизонту	6,68
Ri зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів	5,73
Ri геологічних світ (горизонтів)	9,31
Потужність четвертинного водоносного горизонту (ln)	6,26
Відстань до найближчого карстопрояву (ln)	3,72
Глибина залягання рівня міоценового водоносного горизонту	4,79

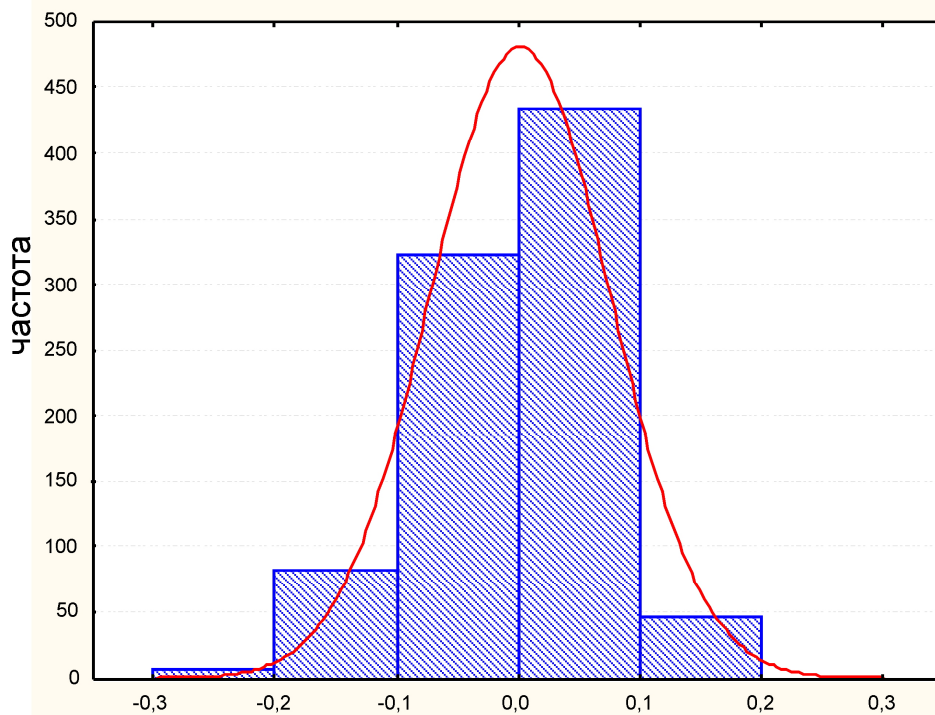


Рисунок 6 – Гістограма інтегрального показника карстоутворення, розрахованого з урахуванням усіх чинників і їхніх вагових коефіцієнтів інформативності для карстових провалів експериментальної ділянки

інтегрального показника, що враховує вплив чинників різної природи, досягає свого максимуму.

У запропонованому нами алгоритмі використовуються еталонні дані безпосередньо по ділянках, де виявлені й зареєстровані карстові провалля. З використанням характеристик розподілу інтегрального показника еталонної вибі-

рки оцінюється ймовірність (або – ступінь близькості) розрахованого інтегрального показника в будь-якій точці на місцевості. Ця ймовірність є критерієм карстопровальної небезпеки.

На рис. 7 представлена прогнозна карта карстопровальної небезпеки для досліджуваної ділянки.

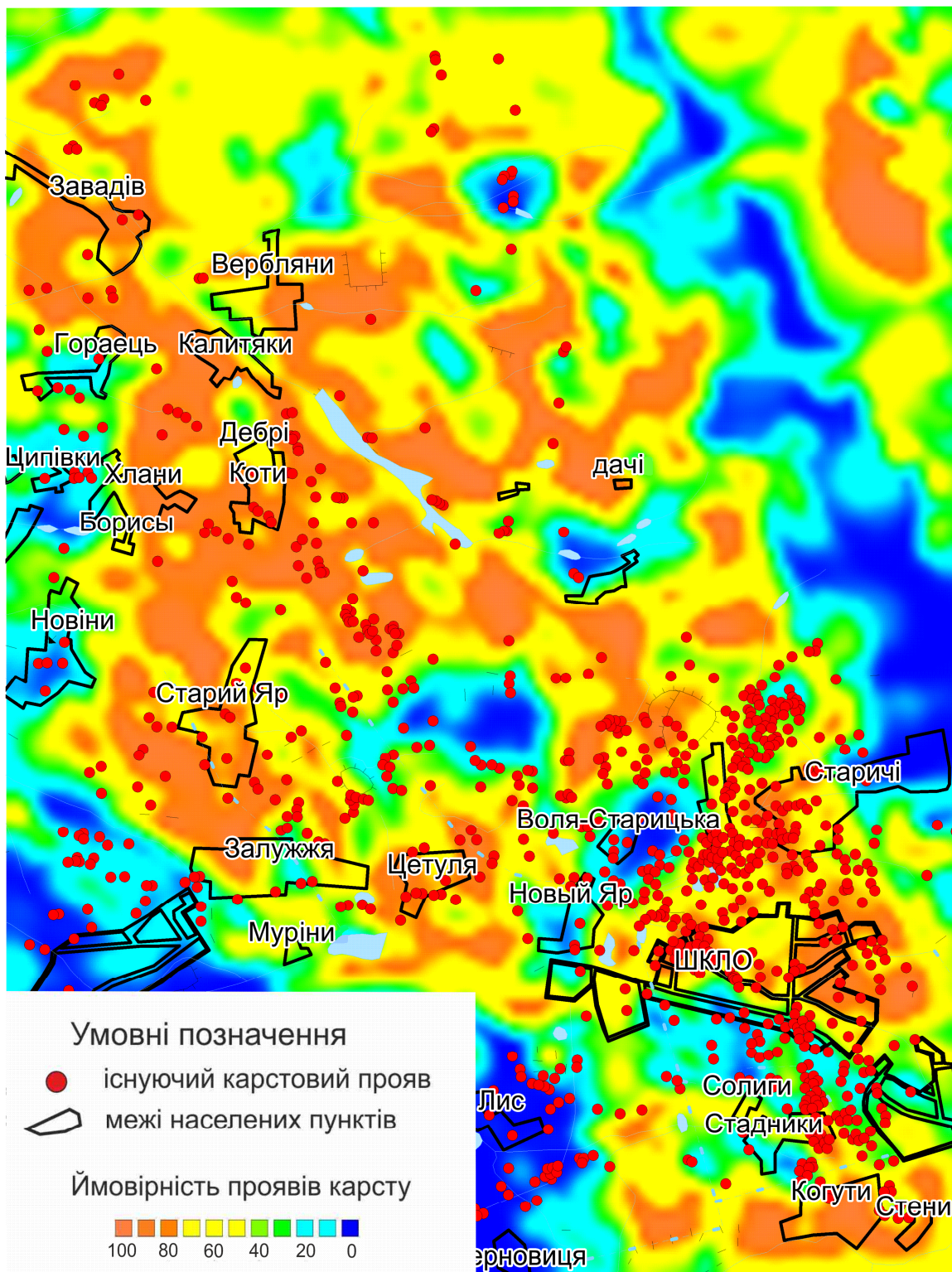


Рисунок 7 – Прогнозна карта ймовірності розвитку провальньо-просадкових проявів сульфатного і карбонатного карсту на території досліджень

Висновки

Активний розвиток і значне поширення поверхневих карстових проявів по території України свідчить про необхідність довгострокового регіонального прогнозування цих процесів у часі та просторі. Проведені теоретичні дослідження дають підстави запропонувати таку послідовність вивчення просторово-часових

закономірностей розвитку карстопровальних процесів: формування бази даних карстових проявів, обґрунтування і вибір чинників процесу карстоутворення, визначення законів розподілу характеристик чинника, уніфікація законів розподілу, оцінка інформативності чинників, розрахунок інтегральних показників, розрахунок прогнозної ймовірнісної функції.

Обрано комплекс значущих за характером впливу просторових чинників. Як просторові чинники обрано геологічні (поширення геологічних горизонтів, літологічний склад четвертинних відкладів), геоморфологічні (базис ерозії, найближчий поверхневий прояв карсту), гідрогеологічні (водопровідність неогенових відкладів, поширення водоупорів, потужність четвертинного і міоценового водоносних горизонтів, рівень підземних вод), тектонічні (тектонічні порушення), геофізичні (гравітаційне поле Землі), техногенні (наявність населених пунктів, ділянок порушення геологічного середовища).

Просторовий прогноз карстопровальної небезпеки здійснюється на основі виявленого закономірного зв'язку просторових карстоініціюючих чинників із просторовим розподілом карстопроявів. Кінцевим результатом досліджень є прогнозна карта карстопровальних явищ для досліджуваної території.

Методичні засади прогнозування карстопровальних процесів на середньомасштабному рівні базуються на врахуванні різних за природою чинників (геологічних, тектонічних гідрогеологічних, геоморфологічних, геофізичних, техногенних), з якими пов'язаний розвиток карсту. Комплексний підхід до використання кількісних характеристик дії чинників дозволив побудувати прогнозу карту ймовірності розвитку провальних-просадкових проявів сульфатного і карбонатного карсту в межах північно-західної частини Львівської області (масштаб 1:100000). На зазначеній карті представлено диференціацію ймовірності розвитку карсту з визначенням небезпечних ділянок, на яких рекомендуються детальні геофізичні дослідження, якщо такі ділянки пов'язані з ризиком для народногосподарських об'єктів і життєдіяльності людей.

У перспективі, подальшим розвитком досліджень, викладених у цій статті є розробка геоінформаційної системи з оцінки карстової небезпеки для певної території, яка дозволить в автоматизованому режимі одержувати інформацію про ймовірність виникнення карстових провалів у просторі.

Література

1 Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році. – Київ: ДП “Агентство “Чорнобильінформ”, 2014. – 542 с.

2 Методы долговременных региональных прогнозов экзогенных геологических процессов / [Под. ред. А.И. Шеко и В.С. Круподерова]. – М.: Недра, 1984. – 167 с.

3 Долговременные прогнозы проявления экзогенных геологических процессов / [Под ред. В.Т Трофимова]. – М.: Наука, 1985. – 152 с.

4 Методические рекомендации по составлению долгосрочных прогнозов экзогенных геологических процессов в системе государственного мониторинга геологической среды / [Шеко А.И., Постоев Г.П., Круподеров В.С. и др.]. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1999. – 78 с.

5 Закономерная связь между величинами вероятностей возникновения и оползневой опасности при комплексном воздействии природно-техногенных чинников. Научное открытие. Диплом №310 / [Кузьменко Э.Д., Крыжанівський Е.І., Карпенко А.Н. и др.] // Научные открытия: Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез. – Москва: МААНОИ, 2007. – С. 64–65

6 Прогноз розвитку зсувних процесів як чинник забезпечення надійності експлуатації трубопроводів / [Кузьменко Е.Д., Крижанівський Е.І., Карпенко О.М., Журавель О.М.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – №4(17). – С. 24-35.

7 Yilmaz Isik. GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: A case study from Sivas basin (Turkey) / Engineering Geology. – 2007. – №90. – Р. 89–103.

8 Чепурний І.В. Довгострокове прогнозування розвитку сульфатного і карбонатного карсту в неогенових відкладах Передкарпаття (на прикладі території Львівської області) // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2009. – №3(21). – С. 34-43.

9 Кузьменко Е.Д. Закономірність розвитку приповерхневого карсту в питаннях надійності експлуатації нафто- і газопроводів / Е.Д. Кузьменко, О.П. Вдовина, І.В. Чепурний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4(29). – С. 5–9.

10 Узагальнення матеріалів по вивченню екзогенних геологічних процесів по території діяльності підприємства та інженерно-геологічне довивчення території Львівської та частково Закарпатської областей з метою геологічного обґрунтування протизсувних заходів та геологічного забезпечення УІАС НС: [звіт про науково-дослідну роботу]/ [Стахів Т., Павлюк В., Гаврилишин І. та ін.]. – Львів: ДП “Західукргеологія”, 2006. – 299 с.

11 Кузьменко Е.Д. Довгострокове прогнозування провальних-просадкових проявів карсту/ Е.Д. Кузьменко, І.В. Чепурний, П.П. Чалий: Монографія. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 272 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
25.09.14*

*Рекомендована до друку
професором Кузьменком Е.Д.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Доліним В.В.*

*(ДУ «Інститут геохімії навколишнього
середовища НАН України», м. Київ)*