

Дослідження та методи аналізу

УДК 551.435.82

АНАЛІЗ УМОВ ПРОЯВУ СУЛЬФАТНОГО ТА КАРБОНАТНОГО КАРСТУ ЯК ФАКТОР БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

*І.В. Чепурний**ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504576, e-mail: igor.chepurny@yandex.ua*

Розглядається аналіз параметрів та умов утворення поверхневих форм прояву карсту як важливого фактора безпечної експлуатації трубопроводів. Особливу увагу приділено Західному регіону України, де значно поширені гірські породи, здатні до карстоутворення, і через територію якого проходять нитки магістральних нафто- та газопроводів. Для цієї території характерними є прояви карбонатного та сульфатного типів карсту, які на поверхні проявляються переважно у вигляді карстових воронок. Порівняльний аналіз умов розвитку поверхневих проявів сульфатного та карбонатного карсту виконано для досліджуваної ділянки у межах Львівської області. Результат дослідження дає змогу оцінити доцільність поділу за типами карсту фактичних даних карстопроявів при створенні регіональних прогностичних моделей їх просторового розвитку. Розглянуто геолого-тектонічну будову досліджуваної території, надається характеристика основних типів поверхневих карстових форм відповідно до геологічних умов залягання карстової товщі. Проведено порівняльний аналіз за морфометричними параметрами поверхневих проявів сульфатного та карбонатного карсту – глибиною, площею, формою в плані, формою у розрізі, типом механізму утворення, ступенем обводнення, фазою розвитку. В місцях поверхневих проявів сульфатного та карбонатного карсту визначено кількісні факторні характеристики основних геологічних, гідрогеологічних, геоморфологічних, тектонічних, геофізичних, техногенних факторів розвитку цих процесів, виконано порівняльну статистичну оцінку отриманих масивів даних.

Ключові слова: карстові форми, фактори розвитку карсту, трубопроводи, статистичний аналіз.

Рассматривается анализ параметров и условий образования поверхностных форм проявления карста как важного фактора безопасной эксплуатации трубопроводов. Особое внимание уделено Западному региону Украины, где широко распространены горные породы, подверженные карстообразованию и через территорию которых проходят нити магистральных нефте- и газопроводов. Основными типами карста на этой территории являются карбонатный и сульфатный, которые на поверхности проявляются преимущественно в виде карстовых воронок. Сравнительный анализ условий развития поверхностных проявлений сульфатного и карбонатного карста выполнен для исследуемого участка в пределах Львовской области. Результат исследования позволяет оценить целесообразность разделения по типам карста фактических данных карстопроявления при создании региональных прогностических моделей их пространственного развития. Рассмотрено геолого-тектоническое строение исследуемой территории, приводится характеристика основных типов поверхностных карстовых форм в соответствии с геологическим условиям залегания карстовой толщи. Проведен сравнительный анализ морфометрических параметров поверхностных проявлений сульфатного и карбонатного карста - глубиной, площадью, формой в плане, формой в разрезе, типу механизма образования, степени обводненности, фазой развития. В местах поверхностных проявлений сульфатного и карбонатного карста определены количественные факторные характеристики основных геологических, гидрогеологических, геоморфологических, тектонических, геофизических, техногенных факторов развития этих процессов, проведена сравнительная статистическая оценка полученных массивов данных.

Ключевые слова: карстовые формы, факторы развития карста, трубопроводи, статистический анализ.

The article deals with the analysis of parameters and conditions of formation of the surface karst manifestations as an important factor of safe pipelines operation. Particular attention is given to the Western region of Ukraine, where rocks, capable of karstification, are spread and in the territory of which there are main oil and gas trunk pipelines. The main types of karst in this area are carbonate and sulfate, which appear on the surface mainly

in the form of karst funnels. The comparative analysis of the conditions of the surface manifestations of sulfate and carbonate karst was performed for the area of interest within Lviv region. The study results allow to evaluate the appropriateness of division of karst manifestations in accordance with the karst types when creating regional predictive models of their spatial development. The geological and tectonic structure of the area of interest was studied and characteristics of the main surface karst types in accordance with the geological conditions of the karst strata occurrence were provided. A comparative analysis of morphometric parameters of surface manifestations of sulfate and carbonate karst – depth, size, plan form, cross section form, formation mechanism type, degree of water flooding, and development phase was conducted. In the places of surface manifestations of sulfate and carbonate karst the quantitative factor characteristics of the main geological, hydrogeological, geomorphological, tectonic, geophysical, and technological factors of these processes development were determined and comparative statistical evaluation of the obtained data were conducted.

Keywords: karst forms, factors of karst development, pipelines, statistical analysis.

Вступ

Карст є небезпечним екзогенним геологічним процесом (ЕГП), прояви якого значно поширені на території України. Карст виникає в тих районах, де розповсюджені розчинні у воді гірські породи – карбонатні, сульфатні, кам'яна та калійна солі. Відповідно до цього розрізняють карст карбонатний, сульфатний і соляний. При розчиненні та вилугованні поверхневими і підземними водами вапняків, доломітів, крейди, мергелів, гіпсу, кам'яної солі на поверхні землі утворюються воронки, провали та інші форми рельєфу, а в товщі гірських порід – різноманітні порожнини, канали, печери. Для карстових районів характерні численні приклади деформацій і провалів споруд. Часто внаслідок катастрофічного розвитку екзогенних геологічних процесів, і карстових процесів зокрема, відбуваються аварійні ситуації на об'єктах трубопровідного транспорту.

Україна володіє розгалуженою газотранспортною системою, об'єкти якої часто розміщуються в геодинамічно активних зонах і можуть піддаватись діям механічних навантажень унаслідок розвитку небезпечних геодинамічних процесів, куди відносять і карстові [1]. У кінцевому результаті це може призвести до деформацій і руйнування труб та інших технологічних конструкцій. На рисунку 1 наведено суміщену карту ураженості сульфатно-карбонатним карстом території Західного регіону України та схему газопроводів ДК «Укртрансгаз». Як впливає з рисунка, карстові процеси значно поширені на зазначеній території, а магістральні газопроводи проходять через території, уражені карстом.

Як впливає з [2], здатними до карстоутворення є території Львівської, Тернопільської, Чернівецької, Івано-Франківської областей. Карстові площі мають різні ступені стійкості, тобто різну інтенсивність утворення карстових провалів, що визначається природно-техногенними умовами кожної окремої території. Тому питання дослідження умов розвитку карстових процесів при розробці прогностичних моделей є актуальним.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Дослідженнями карстових процесів займається ряд вчених в Україні, серед яких варто відмітити вітчизняних науковців: О.М. Адаме-

нка, В.Н. Андрейчука, А.М. Гайдіна, С.В. Гошовського, В.Н. Дублянського, О.Б. Климчука, Г.І. Рудька, Я.М. Семчука та багатьох інших. Роботами, в яких широко висвітлено проблему карсту як геологічного явища, є роботи Д.С. Соколова, Г.А. Максимовича, Н.А. Гвоздецького, D.C. Ford, P.W. Williams, в яких детально описано усі аспекти карстового процесу – умови утворення, геоморфологію, гідрологію тощо. Важливим питанням, якому присвячено значну кількість наукових праць є питання впливу карстових процесів на інженерні споруди, до яких відносять трубопроводи, а також питанням інженерного захисту території. Серед таких праць варто відмітити [3-10]. Стосовно прогнозування розвитку карстових процесів, то таких робіт є небагато. Найчастіше оцінка можливості поширення карстових провалів у просторі визначалась шляхом районування території за певними ознаками – поширеністю карстових порід, щільністю карстопроявів на території тощо. На сучасному етапі виокремився напрямок у прогнозуванні ЕГП, який передбачає визначення небезпеки за факторами, які ініціюють процес. Сюди можна віднести праці [11-13]. Автор приймав участь у роботах з розроблення алгоритму прогнозування карстопробальних процесів [14, 15]. Алгоритм передбачає розрахунок кількісних факторних характеристик у точках карстопроявів, статистичний аналіз отриманих рядів даних з подальшим розрахунком інтегрального показника, на основі якого створюються прогностичні карти. Дослідження, наведені в даній статті, повинні вирішити невирішену раніше проблему, а саме порівняти умови утворення поверхневих проявів сульфатного та карбонатного карсту, морфометричні параметри карстових форм, що дозволить оцінити доцільність урахування типу карсту при створенні прогностичних моделей просторового розвитку поверхневих проявів цих процесів на регіональному рівні.

Задачі та методи досліджень

Як зазначалось, основним небезпечним проявом карсту є утворення провалів та просідань земної поверхні. Фактично це є результатом складного багатофакторного механізму, який можливо деякою мірою формалізувати для моделювання. Основна умова прояву карсту – це наявність розчинних порід та їх тип. Метою дослідження, результати якого наводяться в цій статті, є порівняння основних умов

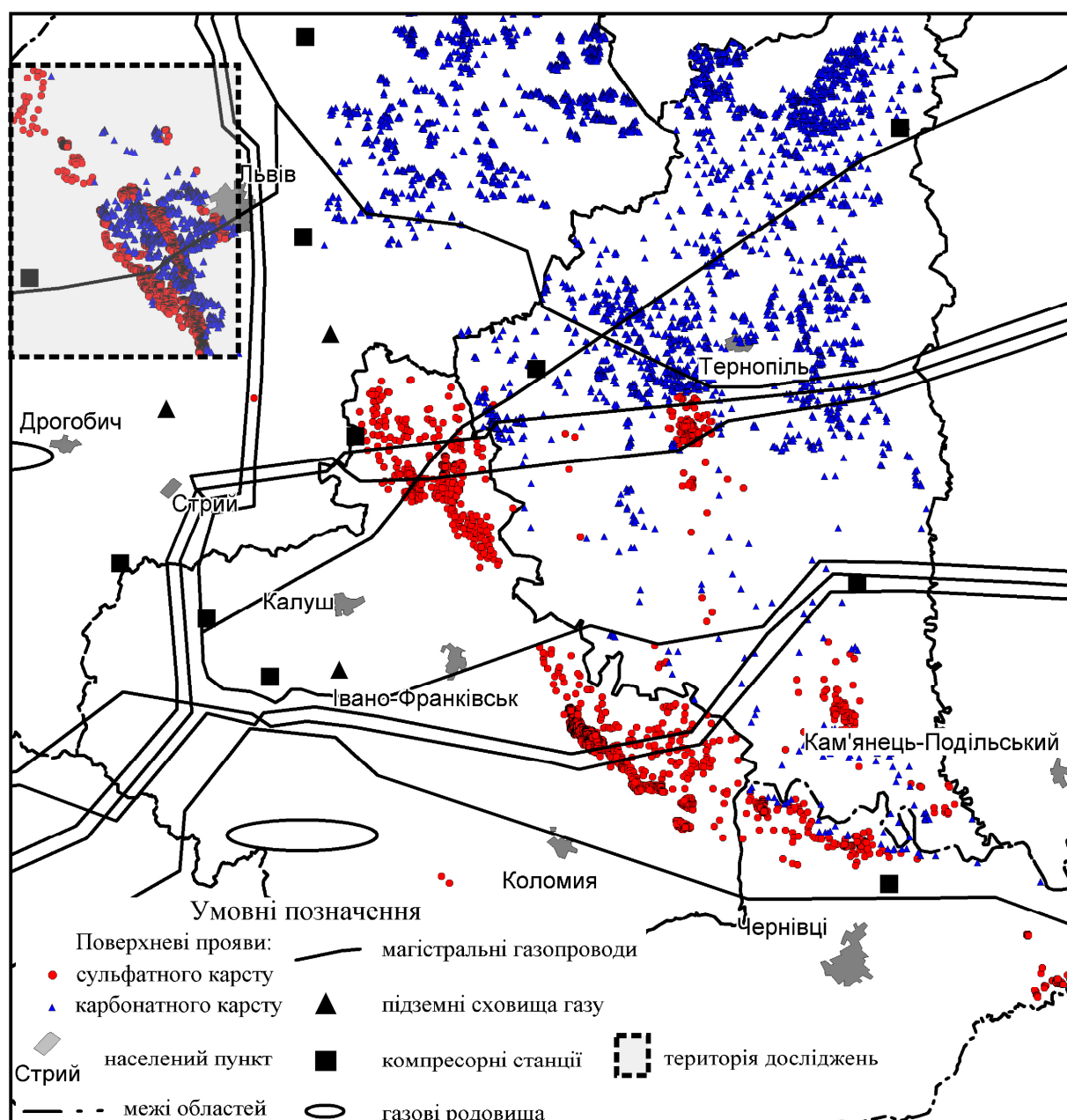


Рисунок 1 – Карта ураженості сульфатно-карбонатним карстом території Західного регіону України з нанесеною схемою газопроводів ДК «Укртрансгаз»

розвитку карбонатного та сульфатного карсту, що дасть можливість зробити висновок про доцільність розподілу поверхневих проявів сульфатного та карбонатного карсту при прогнозуванні.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі завдання:

– на прикладі території, де поширені одночасно прояви сульфатного та карбонатного карсту, надати детальний опис геологічної будови території, що дозволить виявити основні типи поверхневих карстових форм відповідно до геологічних умов залягання карстової товщі;

– методами просторового аналізу ГІС, використовуючи відповідні картографічні шари, визначити кількісні характеристики просторових факторів поширення сульфатного та карбонатного карсту;

– статистичними методами порівняти отримані масиви даних кількісних характеристик факторів для карбонатного карсту та для сульфатного карсту, застосувавши відповідні статистичні критерії.

Основний матеріал дослідження

З рисунка 1 видно, що територія Західного регіону України значною мірою уражена поверхневими проявами сульфатного та карбонатного карсту. Точки карстопроявів винесені на карту згідно каталогу карстопроявів ДНВП «Геоінформ України», абсолютна більшість із них є карстовими воронками (лійками). Частина карстопроявів згідно каталогу відноситься до карбонатного карсту, частина – до сульфатного. Умови формування цих карстопроявів є

Таблиця 1 – Геологічна будова досліджуваної ділянки (за даними [17])

Система	Відділ	Ярус	Під'ярус	Світа	Горизонт	Потужність, м	Літологія
Четвертинна						0-40	Алювіальні, флювіо-гляціальні, озерно-льодовикові піски, супіски, суглинки, глини із включеннями гравію, гальки й великих валунів
Неогенова	Середній міоцен	Баденський	Верхній	Косівська		0-100	Кварцево-вапняковисті пісковики внизу (до 20 м), вище мергелисті глини, шаруваті й грудкуваті
				Тираська	Ратинський	0-30	Вапняки
			Дністровський		0-50	Гіпсоангідрити й кристалічні гіпси із прошарками мергелів, пісковиків і глин	
			Опільська	Нарасвський	30-40	Літотамнієві вапняки із прошарками пісків і пісковиків у нижній частині	
Баранівський	0-33	Глинисті піски й пісковики					
Крейдова	Верхній					Розкритий до 114,5	Кварцево-вапняковисті пісковики, піщані мергелі, рідше глини й глинисті вапняки

різними і формуються сукупністю природних і техногенних чинників. Існують території, де в регіональному масштабі важко розділити поверхневі прояви сульфатного та карбонатного карсту, оскільки ці території мають складну геологічну будову, що зумовлено історією геологічного розвитку. Це передусім зона зчленування платформи та прогину, де породами, що карстуються, можуть бути гіпсоангідрити, гіпси, вапняки. Постає питання про доцільність розділення при прогнозуванні на регіональному рівні проявів сульфатного та карбонатного карсту. Методика, яка використовується при прогнозуванні [14, 15] передбачає створення еталонних прогностичних моделей на основі врахування умов розвитку існуючих карстопроявів. Тобто враховуються умови розвитку карстового прояву (карстової воронки), яка може утворитись, наприклад, під впливом суфозійних процесів, а не процесу розчинення. З іншого боку, існує суттєва різниця між розчинністю сульфатних і карбонатних порід, наприклад, розчинність у природних умовах вапняку, гіпсу та кам'яної солі приблизно представляється співвідношенням $1:10^2:10^4$, що визначає потенціальну інтенсивність відповідних літологічних типів карсту [16].

Тому доцільно провести порівняльний аналіз умов розвитку проявів сульфатного та карбонатного карсту. У якості досліджуваної території обрано територію в межах Львівської області (рис. 1), де зафіксовано 3549 карстопроявів, серед яких 2264 прояви карсту згідно каталогу віднесено до сульфатного, 1285 – до карбонатного. Порядок досліджень такий – слід охарактеризувати геологічну будову території, розглянути умови та механізм утворення поверхневих проявів карсту, використовуючи ГІС-технології визначити кількісні параметри осно-

вних умов розвитку карстових процесів, обчислити основні статистичні характеристики кількісних параметрів факторів розвитку карсту, порівняти їх та зробити висновки.

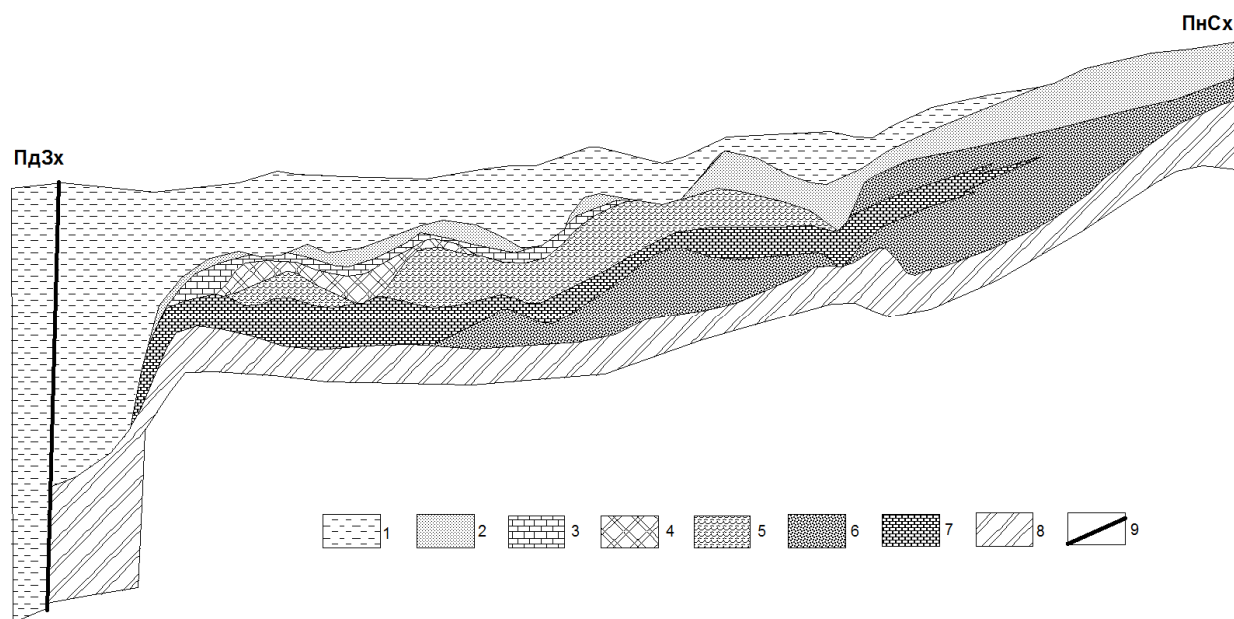
Геолого-тектонічна будова території.

Досліджувана територія розташована в межах крупних геоструктурних регіонів – Східно-Європейської платформи та Передкарпатського прогину. Складена крейдовими (К), нижньобаденськими (N_{1b1}), верхньобаденськими (N_{1b2}) неогеновими та четвертинними (Q) відкладами (табл. 1).

На рис 2 зображено геологічний розріз, який детально відображає стратиграфічну послідовність залягання порід неогену. Розріз наведено згідно з [18], він стосується порід неогену платформи в районі Язівського родовища сірки.

Верхньокрейдові відклади поширені повсюдно, залягають на глибині від 40 до 200 м. У східній частині ці відклади залягають під четвертинними утвореннями, у західному напрямку їхня покрівля занурюється на глибину більше 200 м. Розкрита потужність крейдових відкладів 60-144 м. Це кварцево-вапняковисті пісковики з глауконітом, піщанисті мергелі, рідше глини й глинисті вапняки. Породи в межах району практично безводні [19].

На крейдових відкладах залягають баденські породи, представлені в нижній частині глинистими пісками та пісковиками потужністю від 0 до 32 м (баранівський горизонт). Міоценові відклади на платформній окраїні залягають на розмитій поверхні крейдяних утворень. Крейда представлена тут теригенно-карбонатними відкладами, найчастіше мергелями, пісковиками, детритовими та глинистими вапняками. Розріз міоцену складається баден-



Верхньобаденський під'ярус, косівська світа: 1 – глини вапняковисті; 2 – пісковики кварцові.

Тираська світа, ратинський горизонт; 3 – вапняки; 4 – вапняки з сіркою.

Дністровський горизонт: 5 – гіпси і ангідрити.

Нижньобаденський під'ярус: 6 – піски, пісковики кварцові з окремими прошарками літотамній;
7 – вапняки літотамнієві.

Крейдова система, верхній відділ: 8 – пісковики алевритові; 9 – лінія тектонічного розриву

Рисунок 2 – Геологічний розріз неогену Східно-Європейської платформи у районі Язівського родовища сірки [18]

ськими й сарматськими осадами. Нижній баденій (підгіпсова товща) представлений рядом горизонтів, у складі яких переважають вапняно-глинисто-піщанисті відклади поблизу межі з прогином (потужність 70-90) м і більше, змінюючись у глибину платформи вапняково-біогермними та піщаними фаціями (потужність 10-30 м). У досліджуваному районі в складі нижньобаденської товщі переважають літотамнієві вапняки [19]. Комплекс фацій водоростевих (літотамнієвих) осадів, так званих “нараєвських верств”, має широке розповсюдження серед відкладів опільської світи. У складі цього комплексу, окрім характерних фацій літотамнієвих вапняків, розвинуті фації органогенно-уламкових і біогермних вапняків. Потужність комплексу коливається від 0,5 до 11 м, зрідка сягає 24-34 м.

Горизонт гіпсоангидритів, разом із залягаючими в його покрівлі пелітоморфними та кристалічними вапняками, утворює тираську світу, яка є основним середовищем розвитку карсту даної території. Як зазначено в [19], гіпсоангидритовий горизонт, потужністю від декількох до 35-50 м, представлений гіпсами, а з наближенням до прогину вміст ангидритів у його складі збільшується, гіпсоангидритова товща стає більш однорідною в розрізі. Карбонатні та глинисті прошарки малочисельні й малопотужні. Горизонт пелітоморфних і кристалічних вапняків потужністю від декількох десятків сантиметрів до 25 і більше метрів, зазвичай залягає в покрівлі гіпсоангидритів [19]. Горизонт переважно пелітоморфних вапняків потужністю від

0,2 до 5-10 м, що названий ратинським, має седиментаційне хомогенне походження й розвинений майже всюди на площі поширення гіпсоангидритової товщі. У глибині платформної окраїни північно-східний контур горизонту повсюдно виходить за контур гіпсів і в згладженому вигляді повторює його. Інший різновид утворюють епігенетичні вапняки, утворені в результаті заміщення (метасоматичного або гідрогенного) гіпсоангидритів у ході сульфатредукції, що мають мінливу потужність (до 25 м). Вони переважають у районах сірчаних родовищ, місцями повністю заміщають гіпсоангидрити і можуть бути рудними та безрудними [19].

Характер контакту надгіпсових вапняків з гіпсоангидритами досить мінливий через генетичну відмінність перших і через різний ступінь їхнього гіпергенного перетворення: від поступових переходів до чіткого розділу. Відклади тираської світи узгоджено перекриваються карбонатно-глинистими осадами косівської світи, що також відносяться до верхнього баденію. Поблизу границі з прогином вони представлені переважно глинистими відкладами, з пісковиками та карбонатними прошарками в нижній частині. Верхньобаденські відклади вгорі змінюються товщею сарматських мергелів і глин, потужність яких зростає до 30-50 м у напрямку прогину. Поблизу межі з прогином сарматські відклади літологічно важко відрізняються від осадків косівської світи, разом з якими утворюють глинисту покривку загальною потужністю до 80-100 м [19].

Підсумовуючи викладений вище геологічний опис, можна зробити такий висновок. 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 прилеглих до розломів ділянках. Іншою специфічною особливістю є складність розділення дністровського (гіпсангідритового) і ратинського (надгіпсового) горизонтів тираської світи. Це значно ускладнює можливість просторового прогнозування карсту в регіональному масштабі, оскільки при прогнозуванні необхідні детальні дані про геологічну будову території, які можуть бути отримані або з карт масштабів 1:25 000, 1:50 000 і крупніших, до яких є обмежений доступ, або за даними буріння.

Умови розвитку карсту. Різноманітність карстових гірських порід, умов їх залягання, рельєфу, клімату, зон руху та складу вод і багато інших факторів призводять до утворення різних поверхневих і підземних карстових форм. Відповідно, карстова небезпека території визначається, в першу чергу, наявністю та розповсюдженням активних поверхневих карстових проявів (воронки, ліок).

У геологічній будові території можуть брати участь породи, що здатні до карстоутворення, але поверхневих карстових проявів тут може не спостерігатися. Розвиток будь-якого природного процесу відбувається за наявності поєднання тих конкретних умов. Їх встановлення не тільки дозволяє виділити даний процес серед інших взаємопов'язаних процесів, а й розкриває як характер цього процесу, так і ті умови, які необхідні для його розвитку. Інакше кажучи, встановлення факторів розвитку будь-якого процесу та зв'язку із іншими природними явищами дозволяє пізнавати закономірності розвитку самого процесу. Це твердження, наведене у фундаментальній праці Д.С. Соколова [20], деякою мірою відображає суть методики прогнозування екзогенних геологічних процесів, яка використовується нами.

Основні умови розвитку карсту були сформульовані Д. С. Соколовим таким чином: «Будучи одним із геологічних процесів, карст неминує розвиватися там, де є одночасне поєднання таких чотирьох умов: розчинних гірських порід, їх водопроникності, рухомих вод та їх розчинюючої здатності» [20]. Відсутність однієї з чотирьох умов (у просторі або в часі) виключає можливість розвитку карсту. Саме ці умови дають змогу досить виразно виділити карст серед різних і, зазвичай, пов'язаних між собою геологічних процесів. Тому перелічені умови можуть бути названі основними.

Конкретне поєднання основних умов розвитку карсту може бути найрізноманітнішим. Воно залежить від багатьох факторів і змінюється в часі, визначаючись для кожної області її геологічною історією. Для кожної окремої карстової території існує своєрідність розвитку карсту. Аналіз основних умов і різних факто-

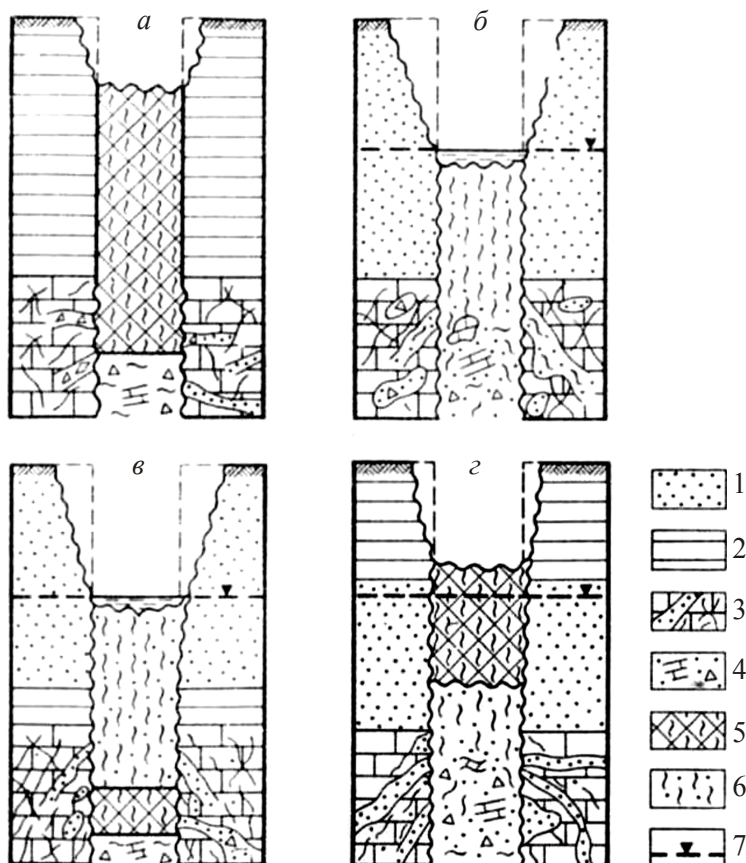
рів, що впливають на їх прояв, дозволяє розкривати та пізнавати загальні закономірності розвитку даного геологічного процесу.

З умов, що найбільш часто сприяють утворенню карсту, слід назвати наступні: клімат і рельєф місцевості, петрографічні особливості карстових порід, умови їх залягання, ступінь тріщинуватості, роздробленості та порушення тектонічними рухами, сучасні та новітні тектонічні рухи, інженерну та господарську діяльність людини.

Важливим питанням щодо розвитку поверхневих проявів карсту є наявність чи відсутність нерозчинного покриву різної проникності над розчинними породами, що впливає на карстовий процес. На основі даної класифікації розвинулись сучасні класифікації за еволюційними типами карсту. Згадані ідеї лягли в основу схеми еволюційної типології карсту, розробленої О. Б. Климчуком та D. Ford [21], яка розглядає типи карсту в контексті загальної геолого-геоморфологічної еволюції та гідрогеологічного циклу.

Карстові форми утворюються в результаті складної взаємодії багатьох геодинамічних процесів, серед яких розчинення або корозія є провідними і характерними. З інших процесів, що беруть участь в карстоутворенні, можна назвати ерозію, обвали, вивітрювання. У нерозчинних породах, що покривають закарстовані товщі або прилегли до них, розвиваються також осідання, обвалення, зсуви, суфозія, ерозія та інші процеси. Це дозволило Д. С. Соколову запропонувати класифікацію основних карстових форм [20]. Згідно цієї класифікації усі карстові форми відповідно геологічних умов залягання карстової товщі поділяються на: 1) ті, що розвиваються у розчинних породах; 2) ті, які розвиваються у нерозчинних породах, що покривають закарстовані чи прилегли до них. Для території, що розглядається у даній статті, особливо важливим є другий тип. Найбільш поширеною формою прояву карсту на поверхні згідно цієї класифікації є карстова воронка. Воронками називаються западини, що мають блюдцеподібну, чашовидну, конічну або циліндричну форму і які утворюються в розчинних у воді породах. Це найбільш поширена форма карстового рельєфу. Карстові воронки характерні для карбонатного карсту, доломітизованих вапняків, доломітів, крейди, мармуру, гіпсу та ангідриду, солей, природної соди. Воронки першого типу поділяються на корозійні, корозійно-ерозійні, провальні, які викликані відповідними генетичними процесами розчинення, ерозії, підземного розчинення, обвалювання. Другого типу поділяються на карсто-суфозійні, корозійно-просадкові, корозійно-провальні, корозійно-зсувні, генезис яких викликаний відповідними процесами суфозії з виносом матеріалу в підземні порожнини, просадкою відкладів покривлі та пониженням поверхні карстової товщі, обрушенням відкладів покривлі, зсувом відкладів покривлі у воронці.

Розмір та форма карстових воронки залежать від складу шарів, що карстуються, їх три-



а – гравітаційний; б – суфозійний; в – гравітаційно-суфозійний; г – суфозійно-гравітаційний.
 1 – пісок; 2 – глина; 3 – закарстований вапняк;
 4 – ослаблена карстова зона; 5 – зміщені глинисті відклади;
 6 – зміщені піщані відклади; 7 – рівень підземних вод

Рисунок 3 – Типи механізмів провалів в районах покритого карсту [17]

щинуватості, шаруватості, а також від місця розташування воронки та інших факторів. Найбільші карстові воронки є в чистих різновидах карстових порід. На початковій стадії вони можуть володіти крутими стінками та бути більш глибокими. У глинистих породах воронки конусоподібної форми є лише на початковій стадії. Надалі вони швидко заповнюються нерозчинними продуктами і мають пологі стінки та плоске дно. В областях покритого карсту карстові породи приховані під товщею покривних утворень та оголюються в стінках воронки дуже рідко. Покривні утворення часто не дозволяють бачити справжню форму воронки.

Практичні детальні дослідження умов утворення та механізму розвитку провалів і осідань земної поверхні в різних природних ситуаціях, проведені авторами [17], дозволили об'єднати всі випадки в залежності від будови масиву, ступеня закарстованості розчинних порід, фізико-механічних властивостей і водопроникності порід, які перекривають ослаблені карстові зони, у чотири типи 1) гравітаційний; 2) суфозійний; 3) гравітаційно-суфозійний; 4) суфозійно-гравітаційний (рис. 3). Слід зазначити, що розміри провальних воронки обумовлені не тільки умовами і факторами розвитку процесів, що порушують стійкість масивів порід, а й осо-

бливостями механізму утворення провалів. При рівних умовах розміри воронки будуть максимальні в тому випадку, якщо вони утворилися гравітаційним чи суфозійно-гравітаційним шляхом.

Найбільш поширеними карстовими формами є воронки, які мають різноманітне походження. Карстові воронки часто розташовуються групами, які, зазвичай, називають полями. Наявність полів карстових воронки зумовлена однорідністю умов деякого фактора карстоутворення. Наприклад, це може бути наявність тектонічних розломів, водопроникних зон порід тощо. Також з вищенаведеного впливають висновки, що провальні воронки є основною формою прояву поверхневого та приповерхневого карсту; кількість провальних воронки однозначно пов'язана з інтенсивністю розвитку карсту, але також велике значення має характер покривних порід в умовах покритого карсту. Кількісні критерії зв'язку можливості утворення воронки і основних чотирьох умов розвитку карсту не підлягають прямому масовому визначенню й не є доступними, виходячи з інформації, що отримується в матеріалах топографічних, геологічних, інженерно-геологічних і інших досліджень. Варто шукати закономірні зв'язки розвитку карстових процесів, які

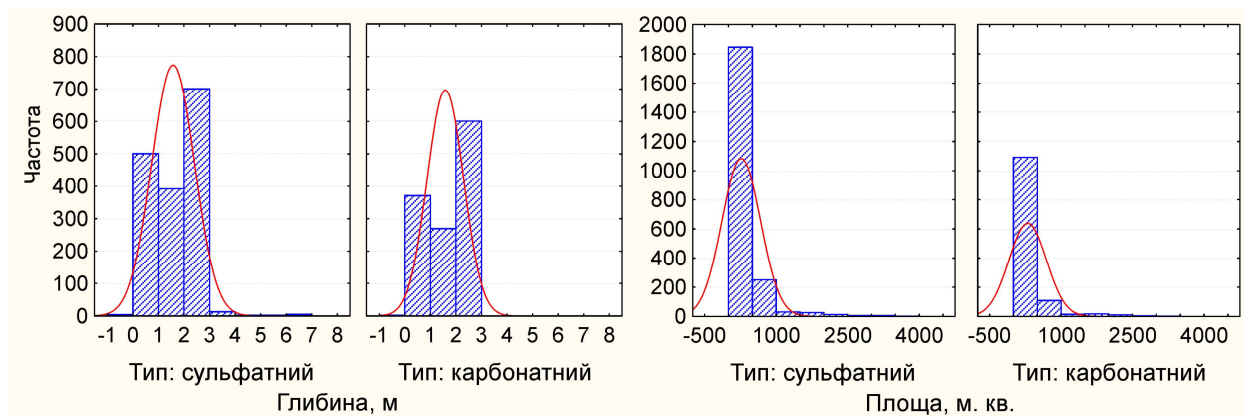


Рисунок 4 – Категоризовані гістограми розподілу для глибини та площі карстопроявів

відображені в провалах, з комплексом геологічних, ландшафтних, геоморфологічних, тектонічних, кліматичних і інших факторів – це єдиний шлях констатації кількісних закономірностей розвитку карсту.

Порівняльний статистичний аналіз

Виконаємо порівняння за морфометричними параметрами поверхневих карстових проявів. На рисунку 4 зображено побудовані гістограми розподілу для двох параметрів карстових воронок: глибина та площа. Як впливає із візуального аналізу гістограм, та підтверджується розрахованими D-критеріями Колмогорова-Смірнова розподіли не є нормальними, тому вимагають застосування для оцінки незалежності двох вибірок непараметричних статистичних критеріїв. Одним із таких критеріїв є U-критерій Манна-Уїтні. Тому для оцінки ступеня незалежності двох статистичних вибірок (морфометричних параметрів для проявів сульфатного та карбонатного карсту) розраховано непараметричний U-критерій Манна-Уїтні. Знайдене значення критерію виявилось значимим ($p < 0.05$) для площі карстопроявів та незначимим ($p > 0.05$) для глибини карстопроявів. Тобто дві вибірки для двох типів карсту сульфатного та карбонатного за параметром площа є незалежними, а за параметром глибина карстопрояву – залежними, тобто належать до однієї генеральної сукупності.

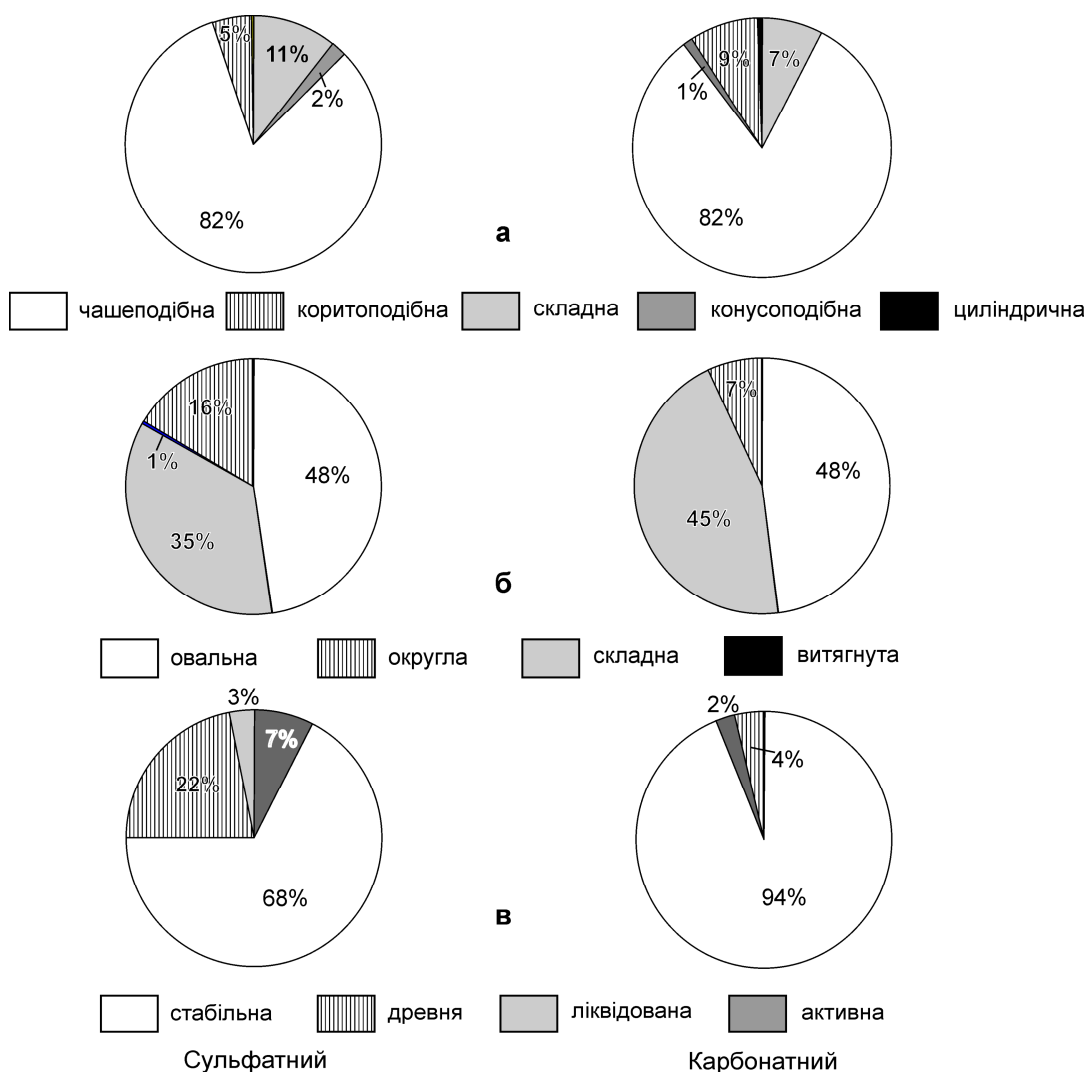
Описовими (якісними) характеристиками поверхневих проявів карсту є їхня форма в плані, форма у розрізі, тип механізму утворення, ступінь обводнення, фаза розвитку. За типом механізму утворення, згідно каталогу, практично всі прояви карсту віднесені до корозійно-суфозійних, за ступенем обводнення – до сухих. На рисунку 5 наведено кругові діаграми, які характеризують розподіл карстових проявів за формою в розрізі, формою в плані та фазою розвитку. За формами в розрізі та в плані прояви карбонатного і сульфатного карсту розподіляються в загальному однаково, а от за фазою розвитку є відмінності – значно більша кількість древніх форм сульфатного карсту та домінування стабільних проявів карбонатного

карсту, але кількість активних провалів є більшою для сульфатного типу карсту.

Принципи регіонального просторового прогнозування розвитку карстопроявних процесів описуються у працях [14, 15]. Цей підхід передбачає кількісну оцінку основних факторів розвитку процесів, їх статистичну обробку та аналіз з розрахунком інтегрального показника, на основі якого створюється прогнозна модель. Враховуючи багатофакторність процесу утворення провальних проявів карсту, на основі аналізу фундаментальних праць по карсту, у попередніх дослідженнях автора було обрано фактори карстоутворення, які використовувались при прогнозуванні карстових провалів на регіональному рівні [14, 15]. З метою порівняльного аналізу впливу цих факторів на розвиток карстопроявів сульфатного та карбонатного карсту засобами аналізу ГІС визначено окремі кількісні характеристики факторів у точках карстопроявів. Розглядалися такі факторні характеристики:

- геологічні – літологічний склад четвертинних відкладів, геологія дочетвертинних відкладів, відстань до тектонічного порушення;
- геоморфологічні – відстань до базису ерозії;
- гідрогеологічні – рівень ґрунтових вод, водопровідність неогенових відкладів, значення гідроізопіс четвертинного та міоценового водоносного горизонту, ізопотужності четвертинного та міоценового водоносних горизонтів;
- інженерно-геологічні – відстань до найближчого карстопрояву;
- техногенні – відстань до ділянок порушення геологічного середовища (кар'єрів, водозаборів), відстань до населеного пункту, відстань до доріг.

Як зазначалось, важливим фактором розвитку карстових процесів є геологічна будова території. Використовуючи методи просторового аналізу ГІС, виконано розрахунок ступені ураженості зон поширення різних типів дочетвертинних відкладів (геологічних світ чи горизонтів) та зон різного типу четвертинних відкладів. На рис. 6 наведено суміщену діаграму, яка характеризує ураженість геологічних світ (горизонтів) карстовими проявами. У якості



а – за формою в розрізі; б – за формою в плані; в – за фазою розвитку

Рисунок 5 – Кругові діаграми розподілу параметрів поверхневих форм сульфатного та карбонатного карсту

кількісної міри ураженості використано коефіцієнт контрастності R_i [14]. Цей коефіцієнт має фізичний зміст коефіцієнта ураженості території:

$$R_i = \frac{N_i / \sum_{i=1}^n N_i}{S_i / \sum_{i=1}^n S_i}, \quad (1)$$

де N_i - кількість зареєстрованих поверхневих карстопроявів у межах i -ї зони (району);

$\sum_{i=1}^n N_i$ - загальна кількість зареєстрованих карстопроявів у регіоні;

S_i - площа i -ї зони (району);

$\sum_{i=1}^n S_i$ - загальна площа території всього регіону;

n - кількість зон (районів) у межах території, яка розглядається.

Як випливає із рис. 6 найбільш ураженим поверхневими карстопроявами є дністровський горизонт, і, відповідно, тут переважає кількість проявів сульфатного карсту (448 проявів проти 22 карбонатного), для зони поширення баранівських шарів коефіцієнт контрастності теж високий, але площа поширення їх незначна (0,001% території) і, відповідно, кількість карстопроявів теж (8 сульфатного та 8 карбонатного карсту). Зона поширення косівської світи займає найбільшу площу серед зон, у межах яких присутні прояви карсту (11 % території досліджень), розрахований коефіцієнт контрастності – 2,92 для усіх карстопроявів, 3,09 для проявів карбонатного карсту, 2,82 – сульфатного; загальна кількість карстопроявів 1580 (більше половини), з яких 607 – карбонатного, а 973 – сульфатного карсту. Цей результат є закономірним, оскільки під косівськими відкладами залягає тираська світа, з якою пов'язаний розвиток як сульфатного (дністровський горизонт), так і карбонатного (ратинський горизонт) карсту. Щодо території поширення нараївських вапняків, то коефіцієнт контрастності для усіх карс-

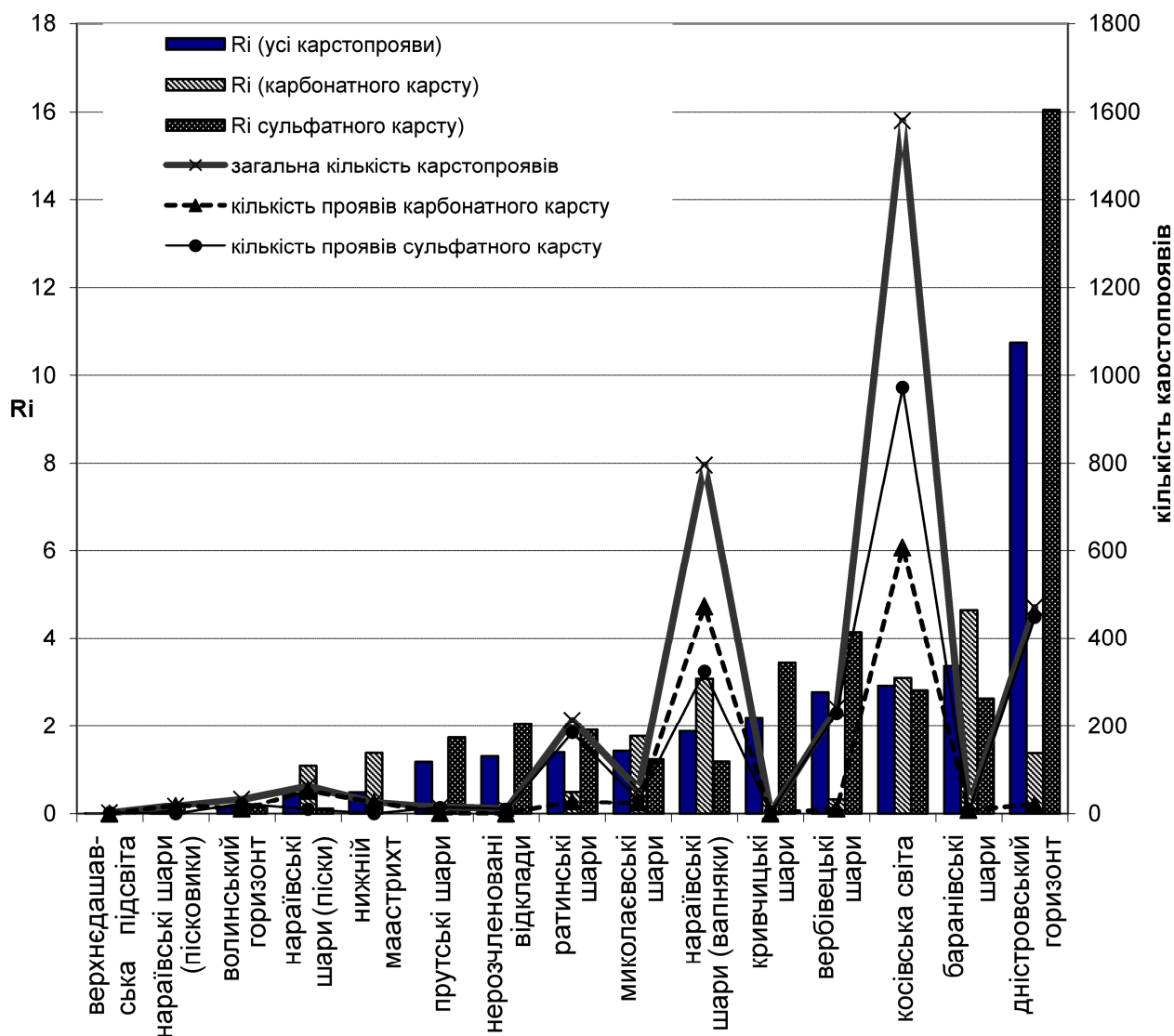


Рисунок 6 – Діаграма зміни величини коефіцієнта контрастності R_i для різних геологічних світ територій досліджень, суміщена з рядом кількості проявів сульфатного та карбонатного карсту

топроявів рівний 1,88, для проявів карбонатного карсту – 3,08, сульфатного – 1,20. Кількість карстопроявів для цієї зони рівна 796, з яких 472 – карбонатного, а 324 – сульфатного карсту. Постає питання, щодо поширення проявів сульфатного карсту у межах цієї зони, оскільки, як зазначалось раніше, сульфатний карст на досліджуваній території пов'язують із дністровським горизонтом тираської світи, який згідно геологічного розрізу залягає вище. Такий результат може бути пов'язаний із масштабом досліджень, оскільки розглядається регіональний масштаб, який не передає усю складність геологічної будови території.

На рис. 7 наведено складені гістограми розподілів ймовірностей значень 11 факторів, визначених безпосередньо по відповідних цифрових картах у точках, де зафіксовані поверхневі прояви карсту.

На гістограмах по осі абсцис відкладені значення факторних характеристик в точках карстопроявів на поверхні, а по осі ординат –

частота зустрічі карстопроявів (провальних воронок). У процесі подальшого аналізу з використанням непараметричного D-критерію Колмогорова-Смірнова встановлено якому з двох основних законів розподілу, нормальному чи логнормальному, підпорядковуються вибірки (табл. 2). Візуального аналізу суміщених гістограм, зображених на рисунку 7, достатньо, щоб зробити висновок про відсутність багатомодальних законів розподілу. Це означає, що кардинальної різниці у впливі обраних факторів на розвиток карстових провалів немає. У табл. 2 наведено розраховані значення D-критерію Колмогорова-Смірнова для різних факторних характеристик, одержаних в точках карстопроявів різних типів карсту, значна різниця у значеннях критерію відсутня. Наочно зміну D-критерію Колмогорова-Смірнова для зазначених масивів даних відображено на рис. 8. Найбільші відхилення в значеннях критерію спостерігаються для факторних характеристик «відстань до розлому», «водопровідність нео-

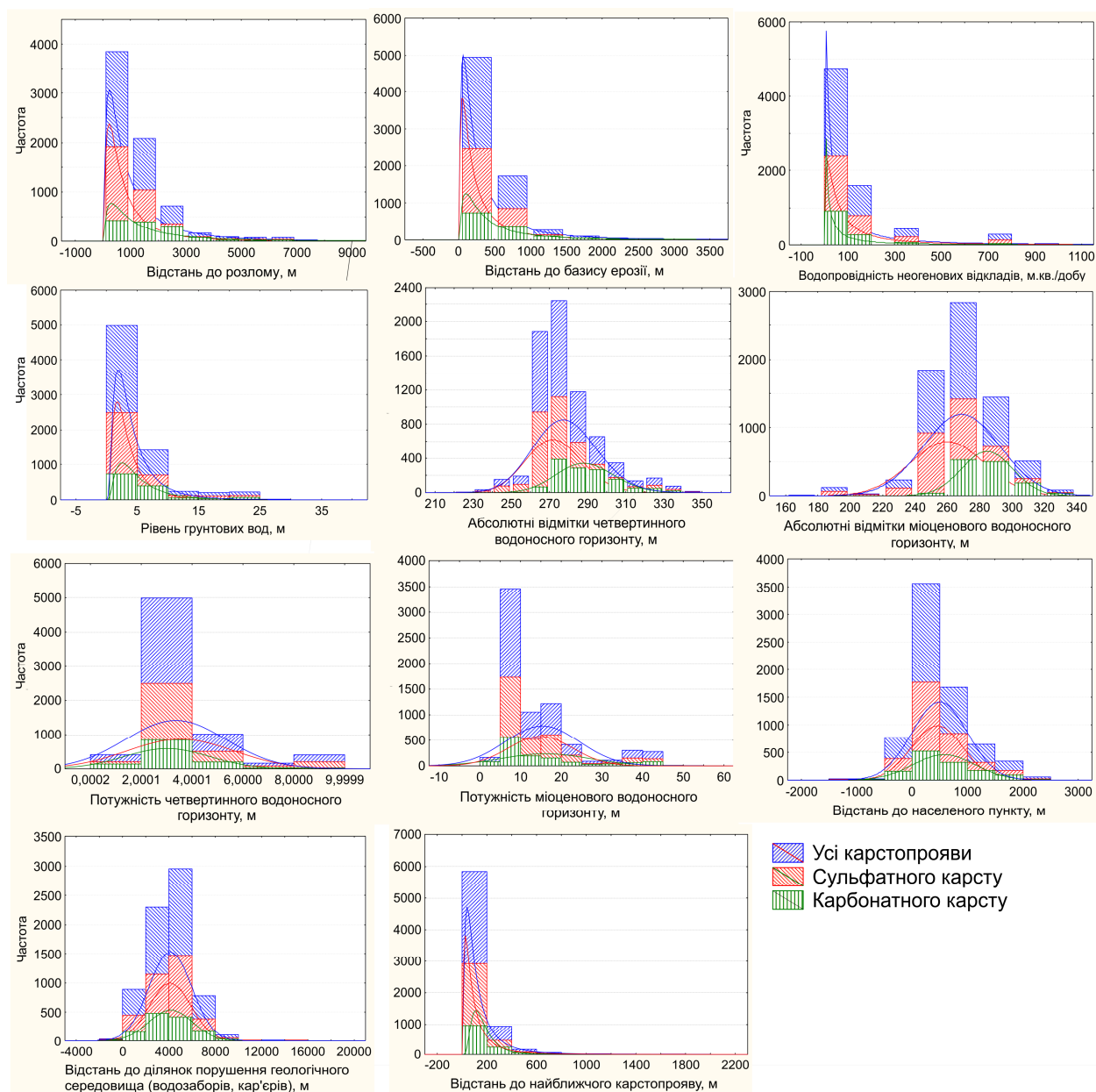


Рисунок 7 – Складені гістограми розподілів факторних характеристик і їхні теоретичні аналоги

генових відкладів», «рівень ґрунтових вод», «абсолютні відмітки міоценового водонасного горизонту», що співставимо з геологічною будовою території. Також використано непараметричний U-критерій Манна-Уїтні для оцінки незалежності пар вибірок сульфатного та карбонатного карсту відповідних факторних характеристик. В останній колонці таблиці 2 наведено результат розрахунку критерію – позначка «+» вказує на те, що значення критерію значиме ($p < 0.05$), позначка «-», що значення критерію не значиме. Як виявилось, тільки за факторною характеристикою «відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів)» вибірки для сульфатного та карбонатного карсту належать до однієї генеральної сукупності. Враховуючи результати досліджень наведені в роботі [22] щодо порів-

няння ефективності використання непараметричного U-критерію Манна-Уїтні та параметричного T-критерію Стюдента, одним із висновків якої є рекомендація використовувати два критерії одночасно, було розраховано T-критерії для оцінки незалежності вибірок сульфатного та карбонатного карсту для різних факторів. Із розглянутих 11 факторів тільки за трьома – «відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів)», «потужність четвертинного водонасного горизонту», «потужність міоценового водонасного горизонту» значення T-критерію виявилось не значимим, що вказує на залежність вибірок сульфатного та карбонатного карсту за цими факторами. За іншими факторами значення T-критерію виявилось значимим ($p < 0.01$).

Таблиця 2 – Оцінка законів розподілу для факторних характеристик сульфатного та карбонатного карсту

Фактор	Закон розподілу вибірки	Критерій Колмогорова-Смірнова (при $p < 0.01$)			U-критерій Манна-Уїтні
		Для проявів карбонатного карсту	Для проявів сульфатного карсту	Для усіх проявів карсту	
Відстань до розлому	Логнормальний	0,146	0,097	0,074	+
Відстань до базису ерозії	Логнормальний	0,087	0,100	0,096	+
Водопровідність неогенових відкладів	Логнормальний	0,296	0,199	0,257	+
Рівень ґрунтових вод	Логнормальний	0,085	0,167	0,137	+
Абсолютні відмітки четвертинного водоносного горизонту	Логнормальний	0,122	0,129	0,121	+
Абсолютні відмітки міоценового водоносного горизонту	Нормальний	0,081	0,116	0,069	+
Потужність четвертинного водоносного горизонту	Нормальний	0,259	0,278	0,269	+
Потужність міоценового водоносного горизонту	Нормальний	0,249	0,280	0,263	+
Відстань до населеного пункту	Нормальний	0,087	0,126	0,111	+
Відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів)	Нормальний	0,051	0,076	0,060	-
Відстань до найближчого карстопрояву	Логнормальний	0,086	0,158	0,160	+

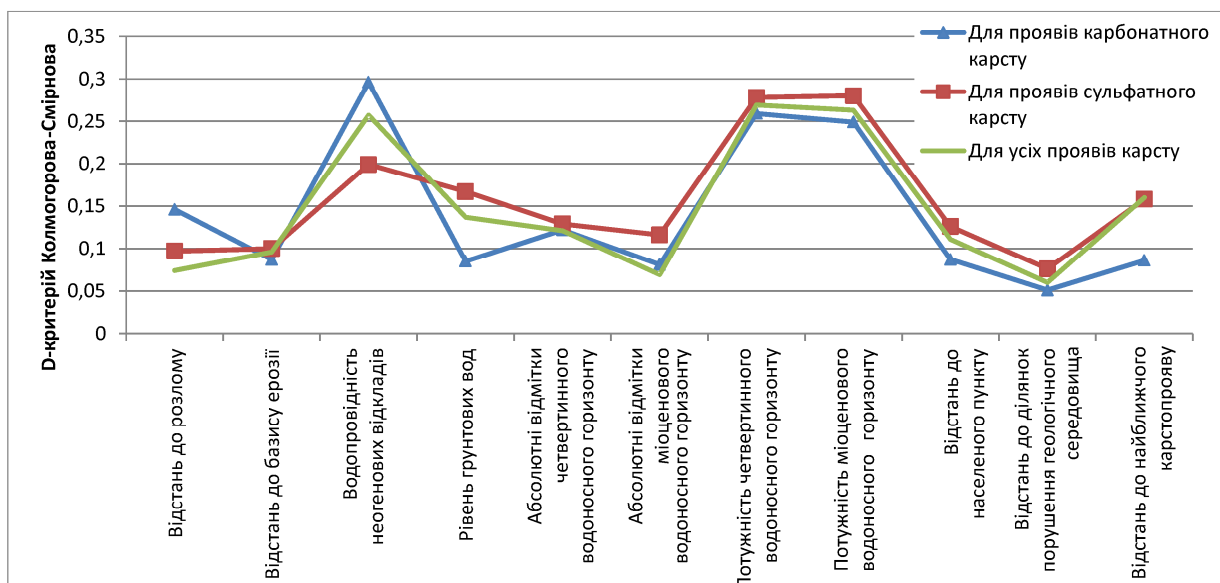


Рисунок 8 – Діаграма зміни D-критерію Колмогорова-Смірнова для різних факторних характеристик для різних типів карсту

Висновки

Карст є небезпечним геологічним процесом, катастрофічний розвиток якого призводить до руйнівних наслідків. Наведене дослідження виконано для території Західного регіону України, яка має складну геологічну будову, що визначається великою кількістю тектонічних порушень, складністю розділення дністровського (гіпсангідритового) і ратинського (надгіп-

сового) горизонтів тираської світи. Це вимагає детального розгляду геологічних, гідрогеологічних та тектонічних умов розвитку карсту з використанням крупномасштабних картографічних матеріалів.

Найбільш поширеними карстовими формами є воронки, кількість яких однозначно пов'язана з інтенсивністю розвитку карсту. Дослідження статистичних розподілів морфометричних параметрів карстових форм на етапі візуа-

льного аналізу та з використанням D-критерію Колмогорова-Смірнова дозволяє стверджувати, що статистичні розподіли є одноmodalними, карстові прояви сульфатного та карбонатного типів представляють один масив даних. Таке твердження є вірним на представленому етапі досліджень. Проте з погляду на відсутність однозначного нормального закону розподілу для різних факторів доцільно використати більш «жорсткі» критерії, які не залежать від законів розподілу. Зокрема, використано U-критерій Манна-Уїтні. В результаті маємо незалежність масивів даних для переважаючої більшості факторів для різних типів карсту. Тому є доцільним у подальшому створювати прогностичні просторові моделі окремо для поверхневих форм різних типів карсту – у даному випадку карбонатного та сульфатного.

У перспективі, подальшим розвитком досліджень, викладених у цій статті є розробка прогностичних моделей просторового розвитку карстопровальних процесів для інших карстових територій України. Питання розділення чи спільного розгляду поверхневих проявів сульфатного і карбонатного карсту повинне розглядатись для кожної окремої території і визначатись, у першу чергу, складністю геологічної будови території, наявністю необхідних крупномасштабних картографічних матеріалів, характером просторового розподілу проявів карбонатного та сульфатного карсту.

Прогностичні моделі можуть бути використані при створенні геоінформаційних систем з оцінки карстової небезпеки для конкретних територій, які дасть змогу в автоматизованому режимі одержувати інформацію про ймовірність виникнення карстових провалів, з метою попередження просідань денної поверхні вздовж нафто- і газопроводів та інших промислових споруд, а також приймати управлінські рішення та вживати необхідні заходи для зменшення ризику аварійності та попередження надзвичайних ситуацій.

Література

1 Энергетична безпека держави: високо-ефективні технології видобування, постачання і використання природного газу / Є.І.Крижанівський, М.І.Гончарук, В.Я.Грудз, А.В.Козлов. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2006. – 282 с.

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

3 Сухов В. А. Проявление экзогенных процессов на трассе нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан / В. А. Сухов // Геоморфологические системы: свойства, иерархия, организованность. – М., 2010. – С. 281-287.

4 Кожевникова Н.В. Обеспечение устойчивости магистральных нефтепроводов на карстовых участках: автореф. дис. канд. техн. наук / Н. В. Кожевникова; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина. – М., 2011. – 24 с.

5 Совершенствование оценки экологического состояния линейных частей нефтепроводов на территориях с интенсивным карстообразованием / А. Г. Поздеев [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 84-93.

6 Кожевникова Н. В. Влияние карста на эксплуатационную надежность нефтепровода. Методы защиты / Н. В. Кожевникова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1. – С. 72-77.

7 Ross, D. Product Pipeline Hazards over Karst Aquifers/ Environmental and Pipeline Engineering.– 2000.– P. 522-530.

8 Yolkin, V. To the Problem of the Assessment of Karst Economic Risk for Pipelines (by the Example of the Tatarstan Republic Southeast)/ Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst.–2008.– P. 724-731.

9 Cooper A. The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain. Geomorphology/ Anthony Cooper, Andrew R Farrant, Simon J Price// Geomorphology.– 2011.– Vol. 134 (1-2).– P.118-123.

10 Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas./Francisco Gutierrez Santolalla, Anthony Cooper, Kenneth S. Johnson // Environmental Geology.– 2008. – Vol 53.– P. 1007-1022.

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

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

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

14 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.

15 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.

16 Экологическая геология Украины: [Справочное пособие] / Е.Ф. Шнюков, В.М. Шестопалов, Е.А. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1993. – 407 с.

17 Кутепов А.Д. Устойчивость закарстованных территорий / А.Д. Кутепов, В.Н. Кожевникова. – М.: Наука, 1989. – 152 с.

18 Алексенко И.И. Сера Предкарпатья / И.И. Алексенко. – М.: Недра, 1967. – 303 с.

19 Климчук А.Б. Роль спелеогенеза в формировании серных месторождений Предкарпатья / А.Б. Климчук. – Симферополь: ДИАИПИ, 2008. – 64 с.

20 Соколов Д.С. Основные условия развития карста / Соколов Д.С. – Москва: Госгеолтехиздат, 1962. – 321 с.

21 Klimchouk A. B. Ford D. Types of karst and evolution of hydrogeologic setting. // Speleogenesis: Evolution of karst aquifers (ed. Klimchouk A. B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W.). – Huntsville: National Speleological Society. 2000. – pp. 45-53.

22 Корнеев А. А. Условия применимости критериев Стьюдента и Манна–Уитни / А. А. Корнеев, А. Н. Кричевец // Психологический журнал. – 2011. – Том 32, № 1. – С. 97–110.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
12.11.14*

*Рекомендована до друку
професором Семчуком Я.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Пукішем А.В.
(відділ екології НДП ПАТ «Укрнафта»,
м. Івано-Франківськ)*