ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.04

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
О. Шабатура, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

МЕТОДИЧНІ ПРИНЦИПИ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КАРСТОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Присвячено аналізу методичних принципів застосування геофізичних методів досліджень при вивченні карстонебезпечних територій. Наведено завдання, що ставляться при спеціалізованих дослідженнях карсту, та геофізичні методи їхнього вирішення. Виділено чотири етапи спеціалізованих досліджень карстонебезпечних територій: рекогносцирувально-методичний, пошуковий, розвідувальний та моніторинговий, визначено комплекси геофізичних методів для цих етапів.

Наголошено, що раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні карстових процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, що використовуються конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування даного геофізичного методу.

Для прикладу наведено деякі результати геофізичних досліджень, виконаних у межах Любенського родовища самородної сірки.

Ключові слова: інженерно-геофізичні дослідження, карстові процеси, електричний опір, електрозондування, комплекс геофізичних методів.

Постановка проблеми. На територіях, верхня частина розрізу (ВЧР) яких представлена гірськими породами, схильними до розвитку в них карсту (карбонати, сольові відклади), необхідно оцінювати ризик прояву небезпечних природних і природно-техногенних явищ і процесів, що становлять загрозу як для безпечного проживання людини, так і функціонування об'єктів господарської інфраструктури.

Карстові процеси широко розповсюджені на всій земній кулі. Вони зустрічаються скрізь, де карбонатні або інші розчинні породи виходять на поверхню землі, або залягають у ВЧР. За оцінками вчених-геологів понад 1/3 земної поверхні складені породами, що тією чи іншою мірою піддаються процесам карстоутворення. Ці розчинні гірські породи розвинені в межах усіх геоструктурних елементів – від стародавніх платформ до молодих геосинклінальних областей. Карбонатні, крейдяні, сульфатні й галогенні породи, схильні до карстування, широко розвинені також в Україні.

Слід зазначити, що карстові процеси належать до категорії найбільш небезпечних і широко розповсюджених екзогенних геологічних явищ. У зв'язку з тим, що активізація карстових процесів під впливом техногенної дії на них може призвести до катастрофічних наслідків, вони є постійною загрозою стосовно виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенно-природного і техногенного характеру.

Відомості про розвиток карстових явищ у товщах гірських порід становлять значний практичний інтерес і повинні враховуватися під час вирішення багатьох народно-господарських завдань, зокрема, при: освоєнні територій під цивільне, промислове, сільськогосподарське будівництво; пошуках і розвідці карбонатних порід і видобутку розчинної породи як корисної копалини; охороні пам'яток природи; створенні підземних сховищ нафти й газу; використанні в бальнеологічних і спортивно-туристських заходах.

Практика показує, що відсутність відомостей про закарстованість площ, а також нехтування можливими деформаціями геологічного середовища під час втручання людини можуть призводити до аварійної обстановки на промислових і цивільних об'єктах, що будуються й експлуатуються, а також при розробці родовищ корисних копалин.

Інтенсивна господарська діяльність людини різко активізує карстовий процес. Водночас вивченість районів розвитку карсту часто вкрай слабка і недостатня для оцінки наявної стійкості ґрунтів і прогнозу їхнього стану на перспективу.

Так, у районі м. Борислав розробка родовища калійних солей підземним способом без достатнього обсягу ціликів призвела до просідання ґрунту і деформації будівель в одному з районів міста. Енергетичний комплекс Рівненської АЕС побудований на території поширення нестійких крейдяних відкладів, тоді як у безпосередній близькості за даними геологічної зйомки широко розвинені базальти венду – міцний фундамент для будівель і споруд. На Солотвинському соляному руднику актуальними є завдання вивчення карстоутворення в покрівлі соляного купола і визначення положення його контакту із вмісними водонасиченими породами з метою уникнення розкриття їх підземними виробками. Отже, системне вивчення районів розвитку карсту в межах України стало життєво необхідним завданням.

Особливо важливим є вивчення карсту під час гідротехнічного будівництва, оскільки різноманітні порожнечі, що утворилися в тілі породного масиву, служать можливими шляхами підвищеної фільтрації води з водосховищ і каналів у тунелі, підземні споруди і шахти. Надзвичайно важливим є вивчення карсту при будівництві атомних електростанцій та інших великих інженерних споруд, коли проникність середовища набуває вирішального значення для обґрунтування можливості експлуатації екологічно небезпечних інженерних споруд.

© Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О., 2021

Карстові порушення масивів порід при будівництві й експлуатації шахт визначають технологічні особливості проходки гірничих виробок і ускладнюють видобуток корисних копалин. За наявності карстових тріщин і пустот створюються умови для інтенсивного припливу в шахти підземних вод, що може призвести до масштабних аварій і катастроф. Крім того, карстові порожнини можуть бути вмістилищем для твердих, рідких і газоподібних корисних копалин (боксити, прісні й мінеральні підземні води, нафта, газ).

При вивченні карсту вирішуються дві групи тісно пов'язаних одного з одним завдань. До першої групи належать характеристика геолого-гідрогеологічної обстановки, яка сприяє розвитку процесів розчинення гірських порід, до другої – безпосереднє виявлення карстових порожнин і закарстованих зон, вивчення умов руху в них підземних вод, прогноз подальшого розвитку ерозійних, суфозійних і низки інших явищ.

За умовами формування, морфологією, літологічною приуроченістю, структурними особливостями, карст характеризується великим розмаїттям. У більшості випадків процес карстоутворення змінює фізичні властивості середовища, що дозволяє застосовувати для діагностики карсту геофізичні методи.

Отже, вивчення карстових процесів полягає у визначенні послідовних змін складу і властивостей гірських порід, що виражають ряд об'єктивних закономірностей, без знання яких неможливе досягнення головної мети – наукового прогнозу розвитку карстових процесів. Регіональне вивчення карстових процесів базується на аналізі інженерно-геологічних умов території та оцінці техногенного навантаження, історії її геологічного розвитку і кліматичних умов.

Геофізичні методи застосовуються для вивчення гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов ділянки, схильної до карсту, впливу їх на об'єкти господарської інфраструктури й екологічну обстановку. При цьому вивчаються закономірності часових змін різних геофізичних полів і параметрів середовища, які відображають особливості розвитку карстового процесу.

Об'єктивна оцінка карстонебезпечності територій потребує вирішення цілої низки завдань. Основними з них є: визначення геологічної будови верхньої частини розрізу, її складу, стану, властивостей, умов залягання та геометричних параметрів окремих товщ гірських порід, їхнього водонасичення і режиму підземних вод. Особливого значення набуває вивчення водотривів у ВЧР, що перекривають і підстеляють горизонти порід, схильних до карсту, та визначення у них "фільтраційних вікон". Вирішення цих завдань з урахуванням матеріалів про гідрологічні та кліматичні умови району досліджень, даними про техногенні навантаження та історію розвитку карсту, служать основою для проведення розрахунків карстостійкості території.

Основою інформаційного комплексу при вирішенні зазначених завдань є детальні екогеофізичні дослідження ВЧР. Верхня частина розрізу – це приповерхнева частина геологічного середовища потужністю в десятки, рідше перші сотні метрів. Вона включає ґрунти, гірські породи, поверхневі, ґрунтові та підземні води, екзогенні фізико-геологічні явища (підтоплення, зсуви, карст тощо) і зазнає інтенсивного впливу екзогенних (атмосферних, поверхневих) і техногенних (фізико-хімічних, енергетичних) процесів. ВЧР характеризується інтенсивним проявом різноманітних факторів– як природних (різкою геологічною та петрофізичною неоднорідністю порід у просторі, часто також у часі), так і техногенних (максимальним проявом різних штучних впливів і фізичних полів). Особливістю ВЧР, що зазнає значних техногенних навантажень, є значна залежність усіх характеристик ґрунтів і порід від координат точок спостережень (як по латералі, так і у вертикальному напрямку). Різко змінюється у просторі й часі також поведінка різних геофізичних полів.

Прогноз розвитку карстових процесів базується на вивченні їхньої мікродинаміки, що знаходить відображення у спостережуваних геофізичних полях. Геофізичні методи досліджень дозволяють обстежити великі площі з детальністю спостережень, яка недоступна для прямих методів інженерно-геологічних вишукувань з використанням буріння значної кількості свердловин. Варто зазначити, що масове буріння свердловин на території, схильної до карсту, може значно посилити карстові процеси і призвести до значних збитків для довкілля. Геофізичні дослідження дешевші за прямі методи і можуть бути виконані за коротший термін. Завдяки всебічному аналізу досліджуваної системи і масовому характеру спостережень геофізична інформація найбільш повно забезпечує можливість моделювання, яке є необхідним елементом інженерно-геологічного моніторингу карстових процесів.

При вивченні карсту моніторингові інженерно-геофізичні дослідження призначені для натурного спостереження за змінами геологічного середовища в зоні розвитку карстових процесів (*Вижва, 2004; Вижва та ін., 2018; Vyzhva et al., 2019*, *2020*; *Кузьменко та ін., 2012*). Отримані геофізичні матеріали використовуються для прийняття науково-технічних рішень на проведення оптимальних захисних інженерно-технічних заходів. Необхідність та обов'язковість спеціалізованих геолого-геофізичних досліджень у районі карстонебезпечних територій з метою прогнозування імовірних геоекологічних змін довкілля випливає з численних прорахунків в обґрунтуванні будівництва та експлуатації різних промислових і соціальних об'єктів. При цьому важливим є математичне моделювання петрофізичних параметрів (*Prodaivoda et al., 2000; Onanko et al., 2011*).

Нехтування організацією моніторингових інженерно-геофізичних та екогеофізичних досліджень карстонебезпечних територій підвищує ризики катастрофічного розвитку в їхніх межах руйнівних і екологічно небезпечних процесів. Значна кількість аварій, що сталися внаслідок різкої активізації карстових процесів, призводить до погіршення екологічної обстановки, утрати матеріальних цінностей, а також до загибелі людей.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Опубліковано низку робіт, присвячених застосуванню методів геофізики для вивчення карстових процесів (*Вижва, 2004; Вижва та ін., 2017*; *2018*; *Vyzhva et al., 2019*, *2020*; *Кузьменко та ін., 2012*; *Огильви, 1990; Соколов, 1962; Шувалов, 1983*), проте систематичні спеціалізовані геофізичні дослідження, а тим більше геофізичний моніторинг, практично не проводяться. Для вивчення карсту переважно використовуються (за можливості) матеріали раніше виконаних на площі досліджень з метою геологічного картування та пошуків родовищ корисних копалин, геофізичних зйомок. Також слід зазначити вкрай незначну кількість публікацій на дану тему з практичними прикладами застосування геофізичних методів для вивчення карсту.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню особливостей і методичних засад застосування геофізичних досліджень (в основному електрометричних) карстонебезпечних територій. Слід зазначити, що геофізичні дослідження територій, схильних до карсту, вимагають підвищеної точності польових вимірювань, застосування

статистичних методів обробки та нових підходів до інтерпретації польових геофізичних даних.

Мета досліджень – аналіз методичних принципів геофізичних досліджень при вивченні карсту.

Для прикладу, у статті також наведено результати комплексних геоелектричних досліджень верхньої частини розрізу карстонебезпечної ділянки на Любенському родовищі самородної сірки.

Фізико-геологічні передумови застосування геофізичних методів при вивченні карсту. Процес вилуговування і розчинення вапняків, доломітів, мергелів, гіпсів, ангідритів, крейди, кам'яної й калійної солей поверхневими і підземними водами супроводжується утворенням на денній поверхні воронок, провалів, а в товщі гірських порід – різноманітних тріщин, порожнеч, печер тощо. Поверхневі й підземні утворення, що виникли в результаті відмічених процесів, є карстом. Для виникнення карсту необхідна наявність: 1) розчинних порід; 2) проникності порід, що є наслідком переважно тектонічної тріщинуватості; 3) активного руху підземних вод, які розчиняють гірські породи і виносять продукти розчинення.

Загальна модель формування умов виникнення карсту дозволяє окреслити такі основні групи завдань при вивченні цього екзогенного фізико-геологічного явища: виділення і літологічна характеристика масивів, складених розчинними гірськими породами, включаючи оцінку вмісту нерозчинного осаду і наявності водотривких прошарків; виявлення ефектів екранування водотривкими утвореннями, що перекривають розчинні породи; визначення положення місцевих і регіональних водотривів; картування давніх похованих ерозійних врізів, які є місцевими або регіональними базисами карстування; вивчення тектонічних структур, що сприяють розвитку карсту (у першу чергу розривних порушень і супутньої їм тріщинуватості). На всіх стадіях вирішення цих питань геофізичні методи відіграють першорядну роль і широко використовуються на практиці.

За основними фізичними властивостями породи, що зазнали карстування, як правило, істотно відрізняються від порід, які не піддалися карстовим процесам. Звідси випливає, що картування таких порід може виконуватися широким комплексом геофізичних методів. Вибір цього комплексу визначається розмірами досліджуваних масивів і геологічних тіл, що їх становлять, товщиною покривних відкладів, характером поверхневого рельєфу й іншими природними та техногенними факторами, які визначають шляхи вирішення поставлених завдань.

Найчастіше крутопадаючі межі закарстованих порід виділяються за допомогою електричного профілювання в поєднанні з електрозондуванням. У разі невеликої товщини покривних четвертинних відкладів ефективною є зйомка радіокомпараційним методом, заснованим на вимірюванні електромагнітного поля довгохвильових радіостанцій, зміни компонент якого вказують на положення контактів. У районах, де карстові породи залягають серед вивержених і метаморфічних порід, широко застосовується магнітна зйомка.

Для вивчення умов розвитку карстових процесів велике значення має виділення стійких до карстування включень і в першу чергу водонепроникних глинистих і глинисто-сланцевих пластів. Ці пласти поділяють карстовий масив на окремі, тією чи іншою мірою гідрогеологічно автономні блоки, у межах яких процеси вилуговування можуть мати багато специфічних особливостей. Крім того, установлено, що поблизу поверхні водонепроникних пластів розвиток карсту в розчинному масиві відбувається найбільш активно. Можливість виділення подібних водотривких пластів як з поверхні, так і у свердловинах, доведено результатами проведених геофізичних досліджень. Характеристика масивів розчинних порід за вмістом глинистих фракцій може бути отримана також за значеннями їхнього питомого електричного опору ρ, потенціалів природного електричного поля $U_п$ і гамма-активності I_γ. Відомо приклади встановлення кореляційних залежностей між цими параметрами і здатністю порід до карстування (*Огильви, 1990; Шувалов, 1983*).

Важливе значення має оцінка ролі водотривких утворень, які є екранами і перекривають розчинні породи. Чітко встановлена закономірність впливу товщини і складу покривних утворень на ступінь закарстованості території. Там, де цей покрив представлений водонепроникними відкладами, ускладнюється проникнення агресивних поверхневих вод у розчинний масив, отже, можливість утворення у ньому карстових порожнин є зниженою.

З метою вивчення покривних відкладів досить ефективними є електрометричні спостереження методом електропрофілювання, що дозволяють визначати ділянки розвитку глин, суглинків, супісків і пісків. Електропрофілювання частіше всього виконується за допомогою дворозносної установки Шлюмберже.

Доведено можливість картування покривних глинистих відкладів у карстонебезпечних районах за допомогою високоточної магнітної зйомки. Комплекс електрометричних методів, доповнений високоточною магнітною зйомкою, дозволяє, зокрема, виділити площі, у межах яких розчинні карбонатні породи мають глинистий екран, що не дозволяє інфільтрацію в них агресивних поверхневих вод.

Визначення положення місцевих і регіональних водотривів є одним з основних етапів формування динамічної моделі підземного водного потоку, що впливає на розчинні гірські породи. Водотриви, якими в більшості випадків є товщі глинистих порід, за своїми геофізичними характеристикам істотно відрізняються від порід, схильних до карсту. Для їхнього виділення у вертикальному розрізі в основному використовуються електричні зондування, оскільки сейсмометрія заломленими хвилями лише в деяких випадках дозволяє визначати положення нижньої межі розчинних порід.

У разі неглибокого карсту в нижній частині товщі розчинних порід утворюється горизонт тріщинно-карстових вод, які часто відрізняються підвищеною агресивністю. Цей горизонт сприяє найбільш інтенсивному розвитку порожнин різних розмірів і форм.

Розвиток карсту не може розглядатись без аналізу процесів зміни базису ерозії в різні геологічні епохи, про що найбільш обґрунтоване уявлення отримують зіставляючи потужності алювіальних відкладів у долинах прилеглих річок. Позиція давніх ерозійних врізів важлива для визначення як положення базису ерозії, так і зон можливого інтенсивного розвитку карстових явищ, які особливо часто приурочені до бортів похованих долин. Пошуки цих долин, їхнє простежування у плані й визначення потужності алювіальних відкладів – одне з важливих завдань геофізичних досліджень. Для його вирішення широко використовуються методи електрометрії, сейсмометрії та гравіметрії. Сприятливі для цього умови є тоді, коли потужність алювію визначається в долинах, врізаних у карбонатні корінні породи, оскільки останні за своїми електричними, сейсмічними та густинними властивостями характеризуються підвищеними показниками порівняно із заповнювальними їх відкладами.

Важливим завданням є також вивчення тектонічних структур, що сприяють розвитку карсту. Тріщинуватість порід уздовж розривних дислокацій забезпечує можливість більш інтенсивної циркуляції підземних вод у цих зонах, а отже, значно пришвидшує розвиток карстових процесів. У багатьох випадках доведено, що підземні карстові потоки, які перетинають ядра вододільних масивів,

розташованих між двома долинами, приурочені саме до зон розривних дислокацій. Виявлення подібних дислокацій – важливе завдання геофізичних досліджень. Ефективними при цьому, наприклад, є профільні електрометричні спостереження методами електропрофілювання.

Завдання визначення меж поширення карсту, виходячи з тектонічних передумов його розвитку, з успіхом вирішуються дистанційними методами. Виявлення систем лінійних елементів ландшафту (лінеаментів) сприяє вивченню спрямованості й динаміки прояву сучасних геологічних процесів та їхнього впливу на навколишнє середовище. На підставі такого аналізу можливе прогнозування зон активного карстоутворення. Із цією метою виконується статистичне зіставлення поверхневих регіональних проявів карсту з геологічними і геофізичними особливостями будови території. При цьому вибираються еталонні ділянки з найбільш інтенсивним проявом карсту та ділянки, де карстові процеси відсутні. Інтерпретація геолого-геофізичних матеріалів полягає в зіставленні сукупності ознак досліджуваної ділянки з невідомими карстопроявами і відповідних сумарних ознак еталонних ділянок. Якщо за обраними критеріями сукупність ознак для досліджуваної ділянки близька до сукупності ознак закарстованих областей, то приймається рішення про її належність до території активного карстопрояву. Сукупність ознак вибирається з урахуванням загальнотеоретичних передумов та узагальнення попереднього досвіду, що характеризує вплив різних чинників на розвиток карсту. Найбільш очевидними ознаками можуть бути: значення електричного опору, поздовжньої провідності й швидкості поширення сейсмічних хвиль у поверхневих відкладах, а також у породах що карстуються; дисперсія цих властивостей по площі; товщини окремих виділених пластів; положення рівня ґрунтових вод; наявність лінеаментів, виділених дистанційними методами і ряд інших.

Основним об'єктом вивчення при карстологічних дослідженнях є порушення (в окремих випадках порожнини), що виникають у поверхневих і глибинних частинах розчинного масиву. Вони можуть мати вигляд вертикальних, похилих або горизонтальних каналів, галерей і печер у самому різноманітному їхньому поєднанні, приурочених до одного або декількох структурних поверхів. До порожнин техногенного походження належать занедбані гірничі виробки, що залишилися після розробки корисних копалин або пройдені з іншою метою. Утворення пустот у масиві карстових порід часто супроводжується провалами й осіданням покрівлі покривних відкладів. Виникають воронки, провали та інші специфічні негативні форми рельєфу денної поверхні. Під карстовими порушеннями слід розуміти не тільки поодинокі форми, а й масиви розчинних порід, які характеризуються переважанням відкритої або заповненої пустотності. Сюди ж входять також зони інтенсивної тріщинуватості, коли тріщини значно розширені за рахунок розчинення. Реакція фізичних полів на всі ці порушення природної обстановки визначається в основному трьома чинниками: контрастністю фізичних властивостей заповнювача порушень і навколишніх порід; геометричними параметрами порушень (їхніми розмірами і глибиною залягання під земною поверхнею); характером розподілу й орієнтації порушень у досліджуваному масиві гірських порід.

Поверхневі карстові порожнини (воронки, сліпі яри, поля тощо) заповнюються зазвичай різними генетичними типами континентальних утворень. За рахунок вивітрювання, змиву і дії річкових потоків вони акумулюють матеріал, літологія і гранулометричний склад якого, а отже, і фізичні властивості, можуть змінюватися у досить широких межах. Контактні області між заповнювачем і корінними породами часто є градієнтними. Неврахування цієї обставини під час визначення розмірів поверхневих карстових форм та їхні глибини залягання можуть призвести до значних помилок. Суттєву роль відіграють такі природні явища, як атмосферні опади і танення снігу, що зумовлюють зниження питомого електричного опору (ПЕО) порід і, навпаки, сприяють підвищенню швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль (особливо в разі піщанистого і гравійного заповнювача).

Заповнювачем підземних карстових порожнин можуть бути: повітря, вода, лід, матеріал кори вивітрювання, стінок порожнин і різного роду перевідкладені утворення, властивості яких визначаються, головним чином, літологічним складом первинного матеріалу, ступенем і характером його переробки та умовами обводнення.

Фізичні властивості складного матеріалу різноманітного походження, що заповнює як поверхневі, так і підземні порожнини, практично завжди (за порівняно рідкісним винятком) відрізняються від властивостей навколишніх порід. Найбільша різноманітність характерна для можливих співвідношень електричних опорів між заповнювачем і вмісними породами. Якщо заповнювач у зоні аерації представлений сухим великоуламковим матеріалом з присутністю в ньому повітря і льоду, його питомий електричний опір характеризується більш високими значеннями порівняно з опором вмісних порід, тоді як у разі глинистого заповнювача його ПЕО буде нижчим, ніж опір вмісних порід. У зоні повного водонасичення практично за будь-якого складу заповнювача (крім льоду) спостерігаються знижені значення ПЕО (порожнини, заповнені водою чи глинистим матеріалом, характеризуються різко зниженим (іноді на 2–3 порядки) електричним опором порівняно із вмісними породами). У разі випадання із циркулюючих розчинів сульфідних мінералів відзначається підвищена здатність порід заповнювача до поляризації.

Швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль у заповнювачі як у зоні аерації, так і в зоні водонасичення, нижчі, ніж у вмісних породах. Виняток становить печерний і тріщинний лід, швидкості в якому можуть бути вищі, ніж у вмісних породах.

Універсальним є співвідношення густини: заповнювач майже завжди характеризується зниженням цього параметра відносно навколишніх порід.

Магнітні властивості заповнювача поверхневих і підземних карстових пустот можуть мати в деяких випадках істотно підвищені показники, наприклад, коли в заповнювачі присутній пісок, що утворився за рахунок руйнування основних вивержених порід, або деякі різновиди бокситів. Найчастіше, однак, заповнювач за магнітними властивостями несуттєво виділяється серед вмісних порід, що під час картування карстових порушень зумовлює необхідність використання високоточних магнітометричних спостережень.

Завдання й комплекс геофізичних досліджень карсту. Аналіз аномалій, викликаних карстовими порушеннями, свідчить, що їхнє вивчення – завдання досить складне і вимагає в багатьох випадках комплексного підходу та спільного розгляду різних геофізичних полів. Спостереження здійснюються не тільки з поверхні землі, а й у свердловинах і гірничих виробках, іноді безпосередньо в доступних для проникнення карстових порожнинах (печерах). Ці роботи виконуються як з метою середньомасштабного картування на стадії техніко-економічного обґрунтування будівництва, так і під час великомасштабної зйомки під конкретні інженерні об'єкти. Крім того, виділяється детальне вивчення карстових процесів, пов'язане з оцінкою стійкості зведених споруд або визначенням їхнього впливу на підземне

будівництво та експлуатацію родовищ твердих корисних копалин. Важливими є також спелеологічні дослідження, які виконуються з метою господарського, туристичного або бальнеологічного освоєння печер природного походження. Вивчення процесів карстоутворення проводиться також при спеціалізованій карстологічній зйомці та під час великомасштабних (масштаб 1 : 25000–1 : 50000) і детальних (масштаб 1 : 1000–1 : 10000) інженерно-геологічних зйомок.

На різних стадіях зазначених робіт широко застосовуються геофізичні методи, які дозволяють вирішувати такі типові завдання:

- виділення в масиві гірських порід закарстованих і незакарстованих ділянок;
- вивчення гіпсометрії покрівлі порід, схильних до карсту;
- розчленування розрізу покривних відкладів з вивченням літології й фільтраційних властивостей водоносних горизонтів;
- визначення глибини залягання рівня ґрунтових вод;
- оцінка потужності товщі порід, схильних до карсту;
- виявлення і простеження ослаблених зон, що сприяють розвитку карсту;
- виявлення карстових порожнин, визначення їхнього просторового положення в розрізі й оцінка їхніх геометричних параметрів;
- визначення місць розвантаження карстових вод, установлення зв'язку підземного та поверхневого карсту і водотоків.

Як уже зазначалося, застосування геофізичних методів базується на відмінності фізичних властивостей закарстованих і незакарстованих порід. Методичний підхід до обґрунтування і постановки геофізичного комплексу визначається етапом робіт (регіональний, пошуковий, розвідувальний і моніторинговий), геологічним регіоном (платформа або складчаста область) і ступенем вивченості території.

Регіональний етап досліджень включає звичайний для геологічної зйомки комплекс методів, який дозволяє уточнювати особливості геологічної будови: магніторозвідка, гравіметрія, електророзвідка в різних модифікаціях, сейсморозвідка.

На етапі пошуків карстопроявів методика геофізичних досліджень визначається ступенем закарстованості й глибиною залягання порід, схильних до карсту. На ділянках слабкого розвитку карсту і неглибокого залягання покрівлі схильних до карсту порід проводяться великомасштабні (масштаб 1 : 25000–1 : 50000) зйомки із застосуванням методів електропрофілювання (ЕП) і природного електричного поля (ПЕП) з мережею спостережень 250 × 25 м або 500 × 50 м. У районах із глибоким заляганням карсту переважна роль відводиться методу вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з мережею точок спостережень 250 × 250 м і 500 × 500 м. Дослідження на окремих профілях доповнюються сейсморозвідкою і в окремих випадках високоточною гравіметрією та магнітометрією. У разі високого ступеня закарстованості території детальність досліджень збільшується до масштабу 1 : 10000–1 : 5000, відповідно густота спостережень досягає 100 × 100 м, 50 × 50 м і до складу робіт включають також кругові й хрестові ВЕЗ.

На етапі розвідки родовищ карбонатних порід і при детальних дослідженнях для оцінки закарстованості майданчиків, відведених під цивільне і промислове будівництво, виконуються детальні геофізичні дослідження масштабу 1 : 5000–1 : 1000 з мережею спостережень 25 × 10 м і 10 × 5 м – для ЕП, ПЕП, високоточної гравірозвідки та магніторозвідки, та 50 × 50 м або 25 × 25 м – для ВЕЗ і сейсмозондування. Отримані на даному етапі матеріали забезпечують вирішення завдань з картування покрівлі схильних до карсту порід, виділення зон порушень і монолітів, виявлення карсту в покрівлі й усередині масиву, визначення розмірів і глибини залягання карсту, з'ясування гідрогеологічної ситуації. Вони є відправними для обґрунтування підрахунку запасів продуктивних покладів, обсягів закарстованих і розкривних порід або є основою вибору майданчиків для будівництва.

На етапі моніторингових досліджень виконуються режимні геофізичні спостереження за змінами геофізичних полів у часі, які пов'язані з динамікою розвитку карстових процесів. Крім того, контролюється ефективність протикарстових інженерно-технічних заходів. Дослідження проводяться комплексом геофізичних методів на попередньо вибраних ключових профілях. Частота циклів геофізичних вимірювань визначається швидкістю розвитку карстових процесів і конкретною геолого-геофізичною обстановкою району досліджень. Комплексний аналіз матеріалів моніторингових спостережень дозволяє зробити прогноз розвитку карстових процесів, вносити корективи в ході виконання захисних інженерно-технічних заходів і контролювати їхню ефективність.

Основна роль при вивченні карстових явищ належить електрометричним наземним методам. Електричні зондування використовуються для вивчення карстового рельєфу покрівлі розчинних порід, їхнього розчленування за літологічними ознаками, виділення у розрізі тектонічних, тріщинуватих і закарстованих зон, визначення глибини залягання підземних вод і базису ерозії, вивчення карстової зональності, а також для вирішення багатьох інших завдань, пов'язаних з вертикальним розчленуванням розрізу.

Значна мінливість геоелектричного розрізу в карстових районах вимагає виконання зондувань з більш густою мережею спостережень, ніж у районах, де карст відсутній. Виходячи з досвіду робіт, можна вважати оптимальною відстань між електрозондуваннями 100 м.

В умовах інтенсивно закарстованих територій порушується плавний хід кривих ВЕЗ і спостерігаються значні розриви під час переходу з однієї приймальної лінії на іншу. Ця обставина так само, як і в разі вивчення зсувів, вимагає проведення кущових зондувань зі зміщеними на кілька метрів центрами установок і побудови синтезованих кривих за усередненими значеннями уявного опору ρ_y.

Основним способом безпосереднього виділення поверхневих і підземних карстових порушень є електричне профілювання. Спостереження мають характеризувати геологічну ситуацію на двох глибинах. На малих розносах отримують інформацію про товщу порід у межах зони аерації. На великих розносах живильної лінії отримують основну інформацію про породи в зоні повного водонасичення.

Розмір установок вибирають, виходячи з особливостей кривих рекогносцирувального електрозондування, попередньо виконаного в різних точках обстежуваної ділянки. Детальне вивчення карстових порушень часто виконується за допомогою несиметричних установок (трьохелектродних або дипольних).

При вивченні карсту широко використовується також електропрофілювання способом серединних градієнтів (ЕП-СГ). Перевагою цього способу профілювання є знижений рівень хибних аномалій і більш висока, порівняно з іншими методами, продуктивність робіт. З позитивного боку зарекомендувало себе також комплексування ЕП-СГ та комбінованого і дипольного профілювань з дослідженнями методом природного електричного поля.

Для вивчення систем витягнутих карстових порушень і зон тріщинуватості застосовуються кругове вертикальне

електрозондування (КВЕЗ) та кругове електропрофілювання. Витягнутість отриманих полярних діаграм указує напрямок простягання карстових пустот і тріщин. Аналіз відношення великих осей полярних діаграм уявного опору до малих для різних розносів КВЕЗ дозволяє скласти уявлення про інтенсивність закарстованості або тріщинуватості масиву порід на різних глибинах. Досить інформативне зіставлення полярних діаграм з матеріалами, що характеризують вихід керна, а також з даними наливів у шурфи або відкачок із свердловин. Отримані результати можна екстраполювати на сусідні площі, у межах яких свердловини відсутні. Для глибокого карсту, розвиненого в потужних товщах розчинних порід, характерне помітне зменшення еліптичності діаграм, отриманих на тих розносах установок, на яких результати вимірів визначаються переважним впливом відкритої пористості підстеляючої товщі порід (нижче базису ерозії).

Кругові спостереження доцільно комбінувати з профільною зйомкою ділянки. Якщо на карті опорів, отриманої за результатами профілювання, намічаються закарстовані аномальні зони, то в їхніх межах виконуються кругові електрозондування, які не тільки уточнюють простягання панівної системи пустотності, а й дозволяють оцінювати ступінь її розвитку.

Відомі численні спроби підвищення чутливості електрометричних методів при вивченні закарстованих ділянок і визначенні положення окремих порушень, засновані на різного роду трансформаціях поля уявного електричного опору ρ_y. Із цією метою часто використовуються багатоелектродні (*Вижва та ін., 2018; Модин и др., 1996, 2006*), фокусувальні й диференціальні електрометричні установки (*Сапужак, 1977*).

Слід зазначити також високу ефективність методу зарядженого тіла (МЗТ) при вивченні закарстованих територій. Цей метод широко використовується в практиці гідрогеологічних досліджень. Карстова порожнина, заповнена водою і глинистим матеріалом, порівняно з високоомними вмісними породами є тілом із суттєво зниженим питомим опором. У зв'язку із цим при пропусканні через це тіло електричного струму його контактна поверхня (поверхня заповненої порожнини) є практично еквіпотенціальною. Як наслідок, ізолінії потенціалу вимірюваного на поверхні землі електричного поля, створюваного стікаючим з контактної поверхні струмом, повторюють контури карстової порожнини. Максимальна концентрація ізоліній потенціалу спостерігається приблизно над проекцією меж порожнини на земну поверхню.

У разі витягнутих карстових порушень типу каналів, галерей і систем закарстованих тріщин використовується методика спостережень, заснована на вимірі градієнта потенціалу вздовж профілів, приблизно ортогональних передбачуваному простяганню досліджуваного об'єкта. У цьому випадку точка перетину графіка градієнта потенціалу з координатною віссю (лінією профілю) визначає положення осі порушення. Отже,, досліджувана зона низьких опорів може бути простежена на значній відстані.

Метод зарядженого тіла включається в рекомендований комплекс геофізичних досліджень під час детального обстеження інтенсивно закарстованих територій з метою оцінки стійкості фундаментів інженерних споруд. Виходячи з досвіду геофізичних досліджень, використання методу зарядженого тіла рекомендується після завершення наземних геофізичних робіт, коли в загальних рисах намічено положення карстового порушення. У центральній його частині буриться свердловина, яка й дає можливість реалізувати метод зарядженого тіла.

Для вивчення карсту неглибокого залягання може застосовуватися метод радіолокаційного підповерхневого зондування (РЛЗ, *ground-penetrating radar* (GPR)), заснований на випромінюванні високочастотних імпульсів электромагнітних хвиль і реєстрації сигналів, відбитих від різних об'єктів досліджуваного середовища (*Владов и Старовойтов, 2004*). Порівняно з іншими геофізичними методами радіолокаційний метод має високу роздільну здатність, яка визначається частотою зондувального сигналу. Водночас у зв'язку з високою частотою випромінюваного імпульсу (75–500 МГц) цей метод має порівняно незначну глибину досліджень, яка у відносно сприятливих високоомних середовищах становить перші десятки метрів.

Електрометричні методи за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань, експресністю та можливістю їхнього виконання в складних геоморфологічних умовах є найбільш універсальними й ефективними при детальному вивченні закарстованих ділянок.

На сучасному етапі під час дослідження карсту широко застосовуються методи сейсмометрії. У разі проведення спостережень методом заломлених хвиль на закарстованих ділянках відзначається інтенсивне їхнє згасання, поглинання і розсіювання, що призводить до погіршення сейсмічного запису. Зазначені особливості є індикаторами і дають можливість фіксувати наявність порушеності в гірському масиві. Ця порушеність відображається у пов'язаних з нею явищах: зниженні граничних швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, зменшенні середніх швидкостей поширення хвиль у покриваючій карстові порушення товщі порід, формі годографів та низці інших ознак.

Найчастіше під час проведення польових спостережень застосовують поздовжнє безперервне профілювання за системою зустрічних і наганяльних взаємноув'язаних годографів. У зв'язку з характерною для закарстованих територій складністю сейсмогеологічної обстановки системи спостережень мають забезпечувати значні перекриття. Окремі завдання вирішуються методом сейсмічних зондувань.

Підвищення роздільної здатності сейсмометрії в карстових районах пов'язане із застосуванням методів, заснованих на генерації гармонійних збуджувальних пружні коливання сигналів. Застосування кореляційного принципу реєстрації та обробки даних дозволяє відокремлювати корисний сигнал від шумів і визначати час його пробігу.

У результаті відповідної інтерпретації простежується шлях пружної хвилі, що дає можливість будувати моделі, які характеризують умови залягання порід і наявність у них карстових порушень. Застосування вібраційної системи збудження пружних коливань дозволяє реалізувати режим накопичення корисних сигналів, що забезпечує вищу якість отримуваних експериментальних даних, а отже, і значно більшу інформативність методу, ніж класична сейсмометрія, заснована на генерації сигналу ударами.

Для виявлення карстових порушень гірських масивів і для вивчення фізико-механічних властивостей розчинних порід, що значно змінюються під впливом карстових процесів, можуть також застосовуватися сейсмоакустичні дослідження у свердловинах.

Для вивчення карстових процесів у деяких випадках застосовуються високоточні гравіметричні зйомки. Аналіз прояву карстових порушень у полі сили тяжіння свідчить про те, що за сучасної точності спостережень методи гравіметрії досить перспективні при вивченні карстової пустотності. Цьому сприяє також той факт, що часто спостерігається приуроченість основних областей розвитку карсту до зон тектонічної тріщинуватості, які відрізняються зниженою густиною. Особлива увага в разі гравіметричної зйомки на закарстованих територіях при-

діляється створенню густої мережі спостережень і високій точності вимірювань. При регіональній зйомці для виявлення локальних карстових структур точність визначення аномалій сили тяжіння в редукції Буге становить 0,08–0,1 мГал і вище. Детальну зйомку, метою якої є вивчення окремих карстових ділянок, виконують з більш високою точністю (≤ 0,04 мГал).

При наземних дослідженнях карстових явищ в окремих випадках використовується також високоточна магнітометрія, термометрія, гамма-зйомка та деякі інші геофізичні методи.

Завданням детальних інженерно-геологічних досліджень на закарстованих територіях є необхідність не тільки планового визначення місць розташування карстових порушень, але й отримання відомостей про їхнє розповсюдження на глибину масиву, характер і геотехнічні властивості заповнювача і навколишніх порід. Особливо важлива така інформація при визначенні місць розташування потенційно-небезпечних промислових об'єктів, підземному будівництві та експлуатації родовищ корисних копалин. Ці завдання вирішуються шляхом різного роду спостережень у внутрішніх точках геологічного середовища. До них належать геофізичні дослідження у свердловинах, у навколосвердловинному і міжсвердловинному просторі, геофізичне обстеження гірничих виробок, просвічування міжвиробкових і міжпечерних ціликів і деякі інші спеціальні спостереження.

Геофізичні дослідження у свердловинах дають можливість: визначати структурну приуроченість карстових проявів; виділяти закарстовані й тріщинуваті інтервали з уточненням у розрізі положення окремих порожнин; оцінювати відносну й абсолютну пустотність порід; характеризувати склад, властивості й стан заповнювача порожнин; визначати глибину залягання базису ерозії; вивчати зональність тріщинно-карстових підземних вод, визначати їхню мінералізацію і динамічні характеристики; з'ясовувати структуру фізичних полів, властивих даному масиву.

Просторове положення та розміри карстових порожнин, які містяться у ціликах розчинних порід між свердловинами і гірничими виробками, визначаються різними геофізичними методами, що мають загальну назву "просвічування". Методи просвічування різноманітні як за характером застосовуваних фізичних полів, так і за технічними особливостями їхнього виконання.

На сучасному етапі при вивченні карстових порушень і моніторингу стану ґрунтів часто застосовують сейсмоакустичне просвічування (*Дейнеко та ін., 2017*). У цьому методі вимірюється час пробігу пружних хвиль між випромінювачем і приймачем, що розташовані в різних свердловинах (виробках). Реєстровані максимальні часи пробігу і низка інших ознак, що визначають аномальне проходження пружних коливань через цілик, дозволяють виявити порушення в міжсвердловинному просторі, оцінити їхню глибину залягання і геометричні параметри. Наявність навколо порушень розущільнених зон значно підвищує роздільну здатність методу.

З метою обстеження міжсвердловинного (міжвиробкового) простору застосовується також радіохвильове просвічування, у якому вивчаються динамічні особливості проходження високочастотного електромагнітного коливання (згенерованого випромінювачем) по міжсвердловинному (міжвиробковому) цілику від випромінювача до приймача, розташованих у різних свердловинах (виробках). На проходження в немагнітних середовищах електромагнітних коливань високої частоти сукупно впливають як електричний опір, так і діелектрична проникність середовищ. Остання може змінюватися для заповнювача карстових порожнин від 1 (повітря) до 81 (вода). Змінюючи взаємне розташування випромінювача і приймача у свердловинах чи в гірничих виробках, визначають місце розташування порушення, його розміри і властивості заповнювача.

Висока роздільна здатність та інформативність геофізичних методів, застосовуваних для вивчення карстових процесів, доведена на багатьох прикладах у різних регіонах країни, зокрема на ділянках, що зазнають техногенного впливу. Основними перевагами геофізичних методів досліджень є оперативність, екологічна чистота і невелика вартість. В умовах закритої території та значної глибини залягання порід, схильних до карстування, геофізичні дослідження дозволяють раціональніше використовувати обсяги буріння. Останнє досить важливо, оскільки механічний розтин свердловиною цих утворень або з'єднання, у результаті буріння, водоносних горизонтів посилює (активізує) карстовий процес.

Експериментальні дослідження. Передкарпатський сірконосний басейн відкритий у 50-х рр. минулого століття. Він розташований у межах Волино-Подільської частини Східноєвропейської платформи, у смузі, яка прилягає до Зовнішньої зони Передкарпатського прогину. Сірконосний басейн простягається на 300 км завдовжки і 40–50 км завширшки. В його межах відкрито близько 20 родовищ сірки. Найбільші з них: Роздольське, Немирівське, Язівське, Любенське, Сороківське, Гуменецьке, Жидачівське, Подорожнянське, Товмацьке. Для прикладу наведемо деякі результати геофізичних досліджень, виконаних на ділянці Любенського родовища самородної сірки. Родовище розташоване на території Львівської області в північно-західній частині Передкарпатського сірконосного басейну. Завдання, поставлені перед геофізичними методами, включали два основні напрями досліджень – структурно-картувальний і карстологічний.

Структурно-картувальний напрям передбачав: оконтурювання гіпсо-карбонатних відкладів тираської світи верхнього тортону; визначення глибини і характеру залягання поверхні докосівських відкладів; простеження тектонічних порушень; визначення потужності четвертинних відкладів і рельєфу корінного ложа.

Карстологічний напрям досліджень включав: виявлення зон закарстованості в сірконосних вапняках і гіпсоангідритах тираської світи; установлення ділянок інфільтрації поверхневих і фільтрації підземних вод.

Успішному застосуванню геофізичних методів для вирішення цих завдань сприяли відповідні фізико-геологічні передумови. Основним об'єктом дослідження на даній ділянці була товща сульфатно-карбонатних відкладів тираської світи верхнього тортону, що становлять продуктивні сірчисті утворення. Ці відклади є добре розчинними здатними до карсту породами, і служать опорним геоелектричним горизонтом. Знизу їх підстеляють вапняки й пісковики нижнього тортону, які за фізичними параметрами не відрізняються від порід тираської світи. Перекривається цей опорний горизонт глинистою товщею косівської світи потужністю до 40 м, сарматськими піщано-глинистими відкладами потужністю від 10 м до 90 м і четвертинними відкладами з високою проникністю (супіски, піски, глини, торфовища) потужністю від 2,5 м до 40 м.

Осадові породи становлять тут тришаровий геоелектричний розріз типу Н з контрастною зміною опорів (90–130; 5–25; 250–500 Ом·м), що дозволило впевнено картувати дві межі поділу – поверхню докосівських відкладів і підошву четвертинних утворень. Закарстованість і тріщинуватість порід змінюють геоелектричний розріз, знижуючи опір шарів, що служить критерієм діагностики зон фільтрації й розвитку карсту (як правило, заповненого уламковим і глинистим матеріалом).

Основними факторами розвитку карсту є водонасичення надгіпсового водоносного горизонту метасоматичних вапняків і швидкість фільтрації розчинів між водоносними горизонтами.

Для вирішення геологічних завдань основна роль відведена методу ВЕЗ у площинному варіанті по мережі точок спостережень 500 × 200 м при деталізації до 250 × 100 м. На ділянках різкої зміни геоелектричних умов площинна зйомка ВЕЗ доповнювалася профільними спостереженнями з кроком 50–100 м. Розноси лінії живлення АВ становили від 300 м до 1000 м. У комплексі з методом ВЕЗ виконана також зйомка методом ПЕП по мережі 100 × 25 м.

У результаті комплексного аналізу отриманих геолого-геофізичних даних складено комплект робочих карт, які супроводжуються геолого-геофізичними розрізами по опорних профілях. Фрагменти найбільш інформативних карт показані на рис. 1–5.

У результаті аналізу даних електрометричних досліджень установлено зв'язок значень мінімуму уявного опору кривих ВЕЗ $\rho_{y,min}$ з різною проникністю порід надкарстової теригенної товщі (Q + $N_{1,ks}$). З використанням цих даних побудовано карту ізоом $\rho_{y,min}$, фрагмент якої наведено на рис. 1. Ділянки, де значення $\rho_{y,min}$ > 20 Ом·м, відповідають областям розвитку порід надкарстової теригенної товщі (Q + $N_{1,ks}$) з підвищеною проникністю, а де $\rho_{y,min}$ < 20 Ом·м – покривним породам з низькою проникністю.

При зіставленні даних ВЕЗ і буріння встановлено залежності між кутом нахилу правої асимптоти кривої ВЕЗ і потужністю закарстованих порід тираської світи, ступенем закарстованості й фільтраційними властивостями покривної товщі. Значення кута нахилу правої асимптоти кривої ВЕЗ у межах 35–45° відповідають монолітним, а 10–35° – тріщинуватим закарстованим породам тираської світи. Результати цього аналізу лягли в основу побудови карти кутів нахилу (α) асимптот кривих ВЕЗ і потужності закарстованих порід, фрагмент якої наведено на рис. 2.

На рис. 3 наведено фрагмент структурної карти опорного горизонту, побудованої за даними кількісної інтерпретації матеріалів ВЕЗ і результатів буріння. На ній винесені: ізогіпси покрівлі відкладів тираської світи; контури поширення порід, схильних до карсту (гіпсоангідрити, вторинні вапняки, сірконосні вапняки); область відсутності відкладів косівської світи (водотриву); тектонічне порушення.

За даними кількісної інтерпретації ВЕЗ і матеріалів буріння побудована також карта ізопахіт надкарстової теригенної товщі (Q + $N_{1,ks}$), фрагмент якої наведено на рис. 4. Карта характеризує товщину покривних теригенних четвертинних і неогенових відкладів. Результати комплексного аналізу отриманих геолого-геофізичних даних винесено на карту комплексної інтерпретації (карту закарстованості), фрагмент якої наведено на рис. 5.

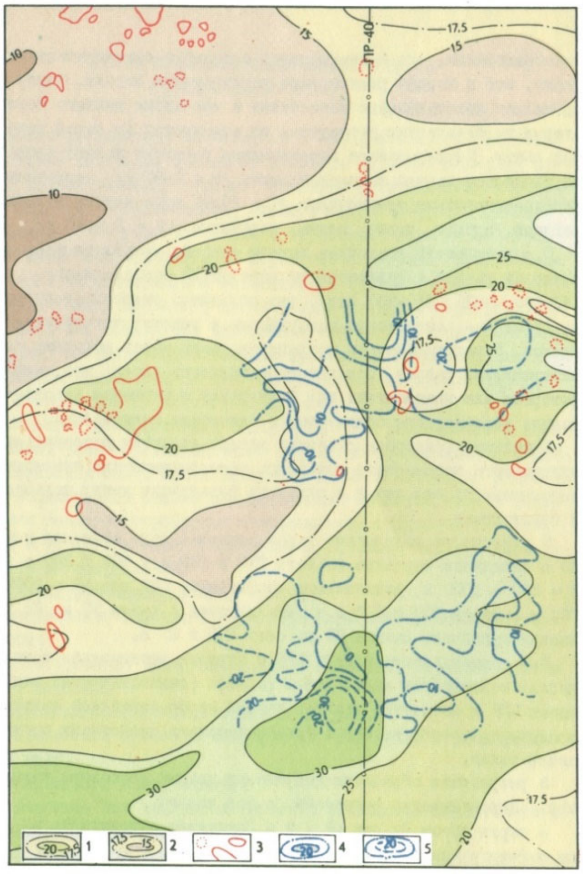

Рис. 1. Фрагмент карти ізоом $\rho_{y,min}$.
Умовні позначення: 1 – поле підвищених значень $\rho_{y,min}$ (відповідає проникним породам (Q + $N_{1,ks}$) з підвищеною проникністю);
2 – поле низьких значень $\rho_{y,min}$ (відповідає породам (Q + $N_{1,ks}$) з низькою проникністю); 3 – карст.
Ізолінії потенціалу методу ПЕП: 4 – позитивні, 5 – негативні

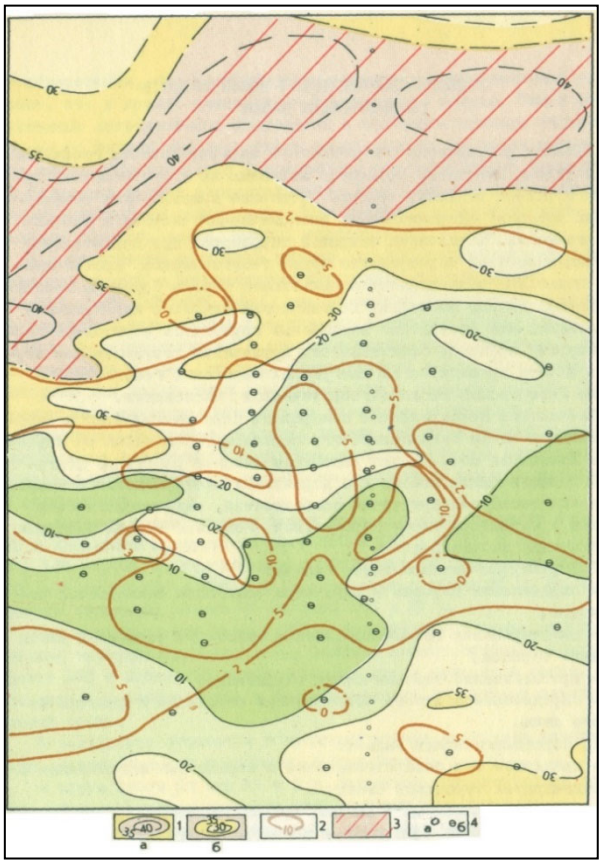

Рис. 2. Фрагмент карти кутів нахилу (α) асимптот кривих ВЕЗ і потужності закарстованих порід.
Умовні позначення: 1 – ізолінії кутів α: інтервал 35–45° відповідає монолітним (а), 10–35° – тріщинуватим закарстованим (б) породам тираської світи;
2 – ізопахіти закарстованих порід за даними буріння;
3 – зона відсутності карсту або його слабкого розвитку;
4 – свердловини (а), у т.ч., які розкрили карст (б)

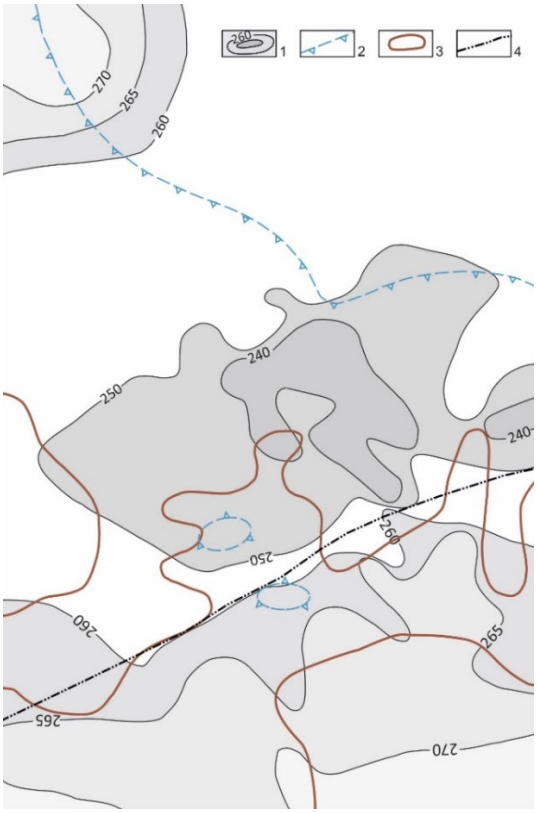

Рис. 3. Фрагмент структурної карти покрівлі опорного горизонту.
Умовні позначення: 1 – ізогіпси покрівлі відкладів тираської світи; 2 – контури поширення порід, схильних до карсту (гіпсоангідрити, вторинні вапняки, сірконосні вапняки); 3 – область відсутності відкладів косівської світи (водотриву); 4 – тектонічне порушення

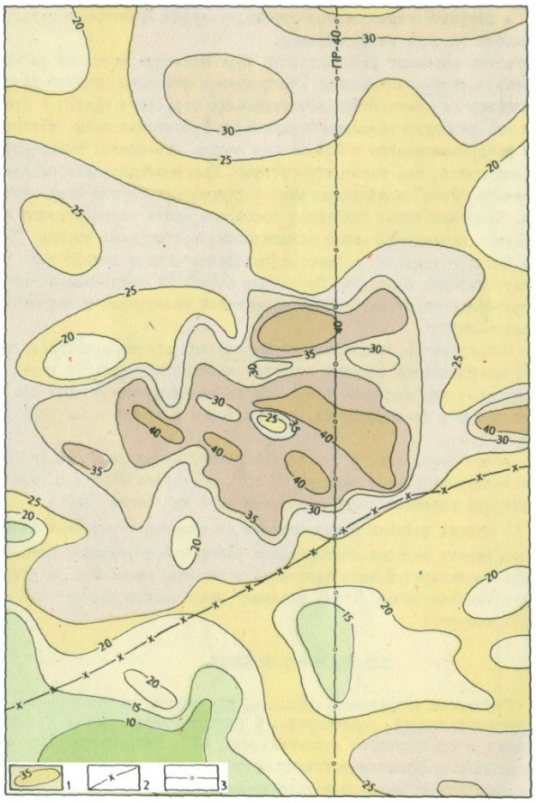

Рис. 4. Фрагмент карти ізопахіт надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$).
Умовні позначення: 1 – ізопахіти надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$); 2 – тектонічне порушення; 3 – лінія геолого-геофізичного розрізу

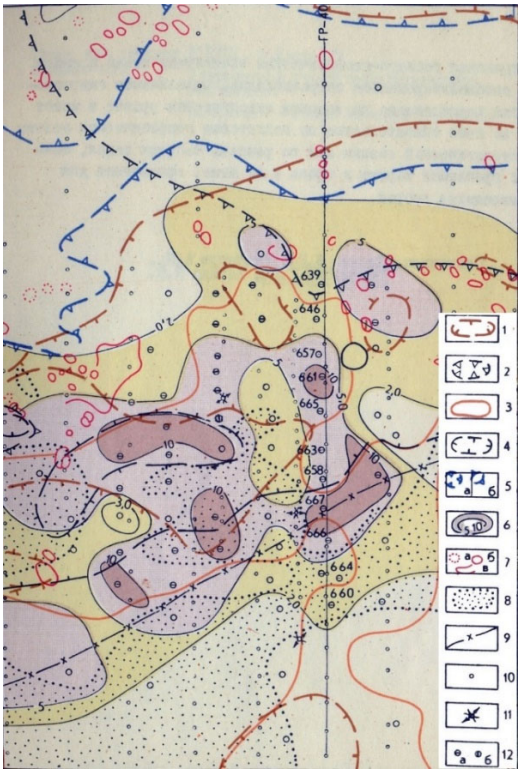

Рис. 5. Фрагмент карти закарстованості Любенської ділянки.
Умовні позначення: *Контури поширення карсту порід за даними буріння*: 1 – гіпсоангідрити; 2 – метасоматичні вапняки; 3 – сірконосні вапняки. *Контури геологічних утворень за геофізичними даними*: 4 – водопроникні породи перекривного чохла; 5 – гіпсокарбонатні породи тираської світи: а) закарстовані, б) незакарстовані; 6 – ізопахіти закарстованих порід (за даними буріння); 7 – карст: а) осідання, б) воронки, в) долини; 8 – зони інфільтрації поверхневих вод (підвищені значення уявного електричного опору при АВ = 9 м); 9 – тектонічне порушення; 10 – пункти ВЕЗ; 11 – напрям тріщинуватості за даними кругових ВЕЗ; 12 – свердловини, у т.ч. що виявили карст: а) заповнений, б) порожнини

За результатами виконаних досліджень визначено контури поширення гіпсо-карбонатного горизонту тираської світи, виділено зони інтенсивної закарстованості та смуга монолітних гіпсокарбонатних порід, де карст відсутній. Карстоутворення в межах ділянки досліджень пов'язано з наявністю водопроникних "вікон" у надтираських теригенних відкладах, що служать водотривом. У місцях, де такі "вікна" відсутні, під водонепроникними відкладами косівської світи залягають монолітні незакарстовані підстильні розчинні породи. Слід зазначити, що в карстоутворенні відіграють важливу роль інфільтраційні процеси. За даними зйомки природного електричного поля встановлюється напрямок водотоку в зонах підвищеної фільтрації в теригенних породах.

Сукупність отриманих геофізичних даних використовується для раціонального ведення геолого-розвідувальних робіт і має довготривалу практичну цінність на наступних етапах при експлуатації родовища, а також промисловому і цивільному будівництві в районі досліджень.

Висновки. На основі викладеного можна прийти до наступних висновків:

1. Для вивчення карстових процесів комплекс геофізичних методів, залежно від завдань і етапу досліджень, включає дистанційні електрометричні, сейсмометричні, еманаційні, гравіметричні, магнітометричні, термометричні та каротажні дослідження. Серед них найбільш універсальними і ефективними за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань при вивченні карстових ділянок є електрометричні методи. Виділяють чотири етапи досліджень: рекогносцирувально-методичний, пошуковий, розвідувальний та моніторинговий. На кожному із цих етапів застосовується спеціалізований комплекс геофізичних методів.

2. Доцільність використання геофізичних методів для вивчення карсту не викликає сумніву. Водночас раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні карстових процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, використовуваним конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування геофізичного методу.

3. На ділянці Любенського родовища самородної сірки, зважаючи на складний рельєф місцевості та економічну доцільність, для вивчення карсту застосовувався комплекс геоелектричних досліджень методами електрозондувань по мережі 500 × 200 м з деталізацією до 250 × 100 м і природного електричного поля по мережі 100 × 25 м. Геоелектричні дослідження показали високу ефективність. За результатами цих досліджень складений комплект карт геофізичних параметрів, що дозволяють оцінити карстову обстановку на ділянці родовища.

4. Надалі, з накопиченням досвіду геофізичних досліджень карсту, цілком реальною є можливість вирішення більш складних завдань, пов'язаних з геофізичним вивченням динаміки карстових процесів шляхом запровадження геофізичного каналу моніторингу. Застосування раціонального комплексу геофізичних досліджень та організація геофізичного каналу моніторингу карстонебезпечних ділянок є необхідними й економічно виправданими засобами для ефективного планування і виконання захисних протикарстових інженерно-технічних заходів з метою уникнення екологічних аварій та катастроф.

Список використаних джерел

Вижва, С.А. (2004). Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. Київ: "Обрії".

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В. (2018). Інженерна геофізика. Підручник. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Іванченко, К.П., Рева, М.В, Дейнеко С.І. (2017). Дослідження геологічної будови територій розміщення гідротехнічних споруд за допомогою геофізичних методів (на прикладі ГЕС "Сенже", Екваторіальна Гвінея). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченко. Геологія*, 77, 36–42.

Владов, М.Л., Старовойтов, А.В. (2004). Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ.

Дейнеко, С., Вижва, С., Нестеренко, Г., Берневек, А., Іващенко, С. (2017). Сейсмоакустичний моніторинг стану ґрунтів Дністровського схилу (у зоні розміщення напірно-стаціонарного вузла). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченко. Геологія*, 3(78), 30–35.

Кузьменко, Е.Д., Чепурний, І.В., Чалий, П.П. (2012). Довгострокове прогнозування провально-просадкових проявів карсту. Івано-Франківськ: Вид-во ІФТУНГ.

Модин, И.Н., Бобачев, А.А., Горбунов, А.А., Шевнин, В.А. (2006). Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. *Приборы и системы разведочной геофізики*, 2, 14–17.

Модин, И.Н., Игнатова, И.Д., Шевнин, В.А., Перваго, Е.В. (1996). Векторная съемка в методе сопротивлений. *Вестник Московского ун-та. Сер. 4. Геология*, 1, 88-91.

Огильви, А.А. (1990). Основы инженерной геофизики. Москва: Недра, 324-378.

Сапужак, Я.С. (1977). Дивергентная электроразведка. Киев: Наукова думка.

Соколов, Д.С. (1962). Основные условия развития карста. Москва: Госгеолтехиздат.

Шувалов, В.М. (1983). Исследование закарстованных территорий и подземных полостей методами электроразведки. Пермь: Изд. ПГУ.

Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.

Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelasic properties of the oceanic upper mantle. Izvestiya. *Physics of the Solid Earth*, 36(5), 394–405.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *XIII International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, *2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Application of geophysical methods in the study of karst. *19th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, *2020 May 11–14, Kyiv, Ukraine.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo123.

References

Deineko, S., Vyzhva, S., Nesterenko, G., Bernevek, A., Ivashchenko, S. (2017). Seismoacoustic monitoring of the state of the soils of the Dniestrian slope (in the zone of accommodation of the pressure-stationary unit). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 78*, 30–35. http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.04. [In Ukrainian]

Kuzmenko, E.D., Chepurnyi, I.V., Chalyi, P.P. (2012). The long-term forecast of the development of the breakdown and subsidence phenomena of karst. Monograph. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Press. [In Ukrainian]

Modin, I.N., Bobachev, A.A., Horbunov, A.A., Shevnin, V.A. (2006). Electrical tomography by the resistivity method and induced polarization. *Devices and Systems of Exploration Geophysics*, 2, 14–17. [in Russian]

Modin, I.N., Ihnatova, I.D., Shevnin, V.A., Pervaho, E.V. (1996). Vector survey in resistivity method. *Moscow University Geology Bulletin,* 1, 88-91. [in Russian]

Ogilvi, A.A. (1990). Fundamentals of engineering geophysics. Moscow: Nedra. [in Russian].

Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*, 33, 529-533.

Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelasic properties of the oceanic upper mantle. Izvestiya. *Physics of the Solid Earth*, 36(5), 394–405.

Sapuzhak, Ya.S. (1977). Divergent electric prospecting. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Shuvalov, V.M. (1983). Exploration of karst territories and underground cavities using electrical prospecting methods. Perm: Perm State University Press. [in Russian]

Sokolov, D.S. (1962). Basic conditions for the development of karst. Moscow: Gosgeoltekhizdat. [in Russian]

Vladov, M.L., Starovoitov, A.V. (2004). Introduction to georadiolocation. Moscow: Moscow University Press. [in Russian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Ivanchenko, K., Onyshchuk, I., Reva, M., & Deineko, S. (2017). Research of geologic structure of territories of hydrotechnical systems allocation by means of geophysical methods (using "Senzhe" HPP as an example, Equatorial Guinea). *Visnyk of Taras*

Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 77, 36–42. http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.04. [In Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *XIII International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Application of geophysical methods in the study of karst. *19th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, *2020 May 11–14, Kyiv, Ukraine*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo123

Vyzhva, S.A. (2004). Geophysical monitoring of dangerous geological processes. Kyiv: "Obrii". [in Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I., & Reva, M.V. (2018). Engineering geophysics. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 27.09.2020

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Email: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura, PhD (Geol.),
E-mail: dard@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF GEOPHYSICAL STUDIES OF KARST DANGEROUS TERRITORIES

The article is devoted to the analysis of the methodological principles of applying geophysical research methods in the study of karst-hazardous territories. The tasks that are posed in specialized studies of karst and geophysical methods for their solution are given. Four stages of specialized studies of karst-hazardous territories are identified: reconnaissance-methodological, prospecting, reconnaissance and monitoring. The set of geophysical methods for the development of these stages are determined.

It is noted that a rational set of geophysical methods in the study of karst processes is determined for each individual natural environment (individual site). The possibility of performing field research by a separate geophysical method in this area, the presence of differentiation in rocks according to their physical properties which are used by a specific geophysical method and economic efficiency of the application of this geophysical method were taken into account.

As an example, some results of geophysical studies carried out in the framework of the Lyubensky field of native sulfur are given.

Keywords: engineering and geophysical research, karst processes, electrical resistance, electrical sounding, a set of geophysical methods.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
Н. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАРСТООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Посвящено анализу методических принципов применения геофизических методов исследований при изучении карстоопасных территорий. Рассмотрены задачи, которые ставятся при специализированных исследованиях карста, и геофизические методы их решения. Выделены четыре этапа специализированных исследований карстоопасных территорий: рекогносцировочно-методический, поисковый, разведывательный и мониторинговый; определены комплексы геофизических методов для этих этапов.

Отмечено, что рациональный комплекс геофизических методов при исследовании карстовых процессов определяется для каждой отдельной природной обстановки (отдельного участка) с учетом: возможности выполнения полевых исследований отдельным геофизическим методом на данном участке; наличии дифференциации пород по физическим свойствам, используемым конкретным геофизическим методом; экономической эффективности применения данного геофизического метода.

Для примера приведены некоторые результаты геофизических исследований, выполненных на площади Любенского месторождения самородной серы.

Ключевые слова: инженерно-геофизические исследования, карстовые процессы, электрическое сопротивление, електрозондирование, комплекс геофизических методов.