

# ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837

В. Ю. МАКСИМЧУК, О. Я. САПУЖАК, С. А. ДЕЩИЦЯ, О. І. РОМАНЮК, О. І. ПІДВІРНИЙ, В. В. КОЛЯДЕНКО, В. Р. ТИМОЩУК

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б, тел. +38(032)2648563, ел. пошта @cb-igph.lviv.ua

## ОЦІНКА КАРСТОПРОВАЛЬНОЇ НЕБЕЗПЕКИ У МЕЖАХ СТЕБНИЦЬКОГО КАЛІЙНОГО РОДОВИЩА МЕТОДАМИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ

<https://doi.org/10.23939/jgd2019.01.076>

**Мета.** Метою роботи є виявлення потенційно екобезпечних карстопровальних зон та прогнозування розвитку карсту на ділянці автодороги Східниця–Пісочне у межах впливу полів рудника №2 Стебницького родовища калійної солі електророзвідувальним методом зондувань становленням електромагнітного поля (ЗС). **Методика.** Дослідження виконувались із використанням методу ЗС у модифікації „контур у контурі”. Для вивчення верхньої частини розрізу до 100 метрів застосовано цифрову електророзвідувальну апаратуру „Стадія”. Для отримання інформації про глибини від 50-100 метрів і до 300-400 метрів використано цифрову електророзвідувальну станцію „Імпульс 3М”. Польові спостереження методом ЗС методично складались з трьох етапів, до яких входили: проведення зондувань на параметричних свердловинах, завдяки чому уточнюються електричні параметри геологічного середовища; проведення спостережень вздовж визначених профілів та побудова за отриманими результатами геоелектричних розрізів з прив’язкою до літології району робіт. **Результати.** На ділянці досліджень у північній її частині у відкладах гіпсо-глинистої шапки виділено зони аномальної електропровідності, природа яких пов’язується з фільтраційно-суфозійними процесами, а також аномалію виявлено у південній частині ділянки у відкладах воротищенської свити на глибинах понад 100 метрів, що пов’язується з утворенням депресійної лійки. **Наукова новизна.** Досліджено можливості методу становлення електромагнітного поля для вивчення карстопровальних процесів на території Стебницького родовища калійної солі. Вперше за допомогою електророзвідувальних методів зроблено оцінку стану геологічного середовища у межах шахтного поля рудника №2 Стебницького родовища калійної солі на ділянці автодороги Східниця–Пісочне. Показано, що методом ЗС при комплексуванні двох типів установок різної глибинності дозволяє детально діагностувати геологічне середовище у діапазоні глибин від 10 до 400 м з виділенням зон аномального електричного опору, що пов’язуються з суфозійно-фільтраційними процесами. **Практична значущість.** За результатами електромагнітних спостережень на ділянці автодороги Східниця–Пісочне у межах шахтних полів рудника №2 Стебницького родовища калійних солей виділено зони, охоплені фільтраційно-суфозійними процесами. Зазначені зони є першочерговими об’єктами, які повинні бути предметом пильної уваги для подальшого моніторингу карстопровальних процесів, а факт їх наявності необхідно враховувати при прийнятті управлінських рішень органами влади про доцільність перенесення місць розташування автомагістралі та інших об’єктів інфраструктури.

**Ключові слова:** Стебницьке родовище; калійна сіль; суфозійно-фільтраційний процес; електророзвідка; гіпсо-глиниста шапка; карст, депресія.

### *Вступ*

Інтенсивний багаторічний видобуток калійних солей у районах гірничовидобувних об’єктів Передкарпаття негативно впливає на геологічне середовище. Розроблення родовищ калійних солей призводить до порушення гідрогеологічних умов у районах шахтних полів, що сприяє активізації розвитку небезпечних геологічних процесів, зокрема карсту, зсувів, утворення депресійних лійок.

До таких екобезпечних об’єктів належить Стебницьке калійне родовище, де видобуток солей

відбувається на рудниках СТ-КР-1 і СТ-КР-2. Над відпрацьованими шахтними полями рудників внаслідок інфільтрації пластових вод у гірничі виробки утворилась депресійна лійка, у межах якої відбувається інтенсивний розвиток карсту [Гайдін, Рудько, 1998]. Про це свідчать карстопровальні явища, які відбувались на території впливу шахтного поля рудника №2, зокрема 30 вересня 2017 року тут утворилось провалля діаметром близько 300 м і глибиною понад 40 м [Гайдін, 2017], внаслідок чого зруйнувалась лінія електропередач і під загрозою

опинилась автодорога Східниця–Пісочне, на якій виявлено просідання асфальтового покриття та утворення багаточисельних тріщин [Максимчук та ін., 2019].

У зв'язку з цим першочерговим об'єктом електророзвідувальних досліджень стала ділянка

автодороги Східниця–Пісочне (рис. 1) у межах шахтного поля рудника № 2 Стебницького калійного родовища між населеними пунктами с. Солець (західна околиця м. Стебник) та м. Трускавець для оцінки загрози її руйнування.

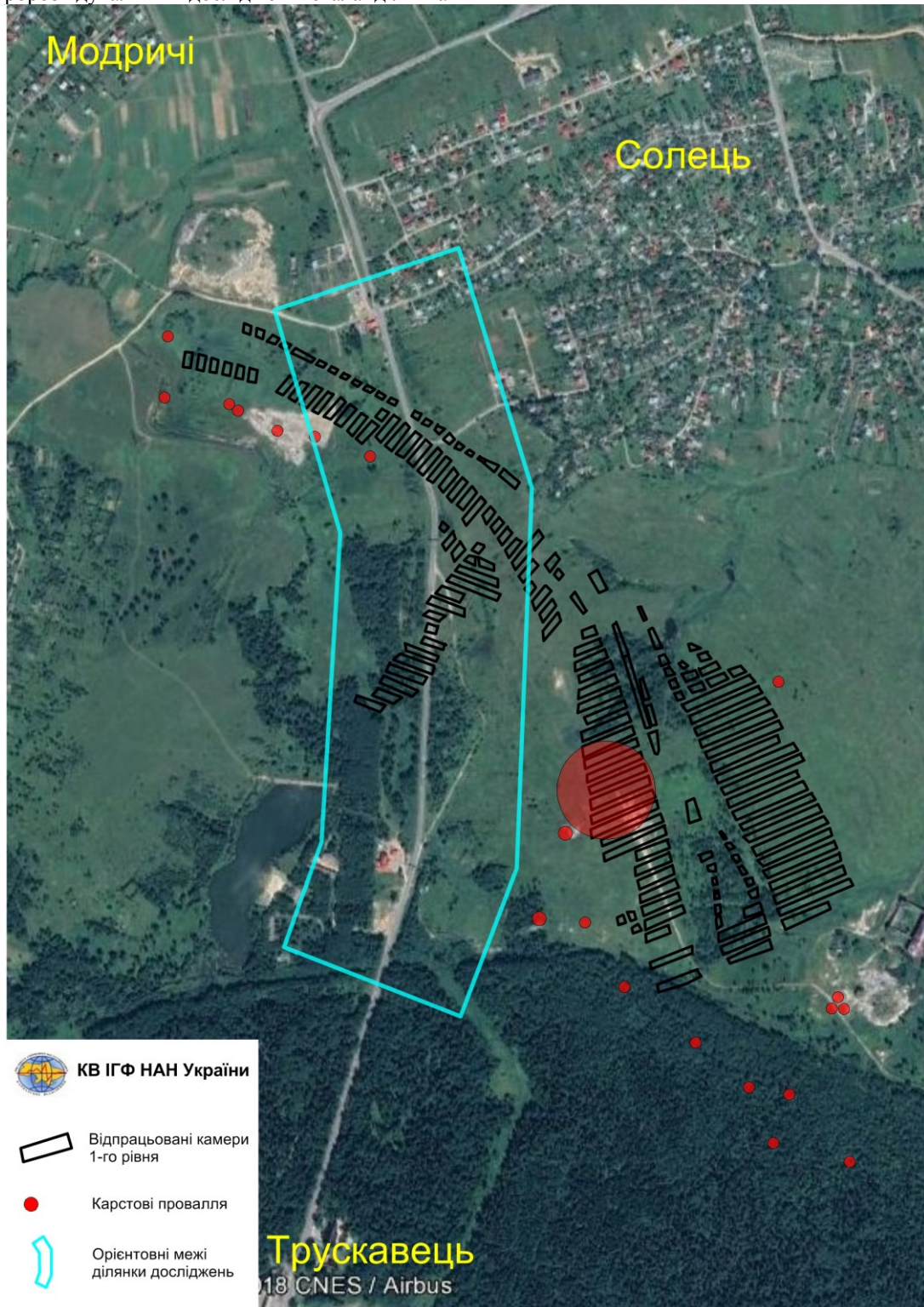


Рис. 1. Ділянка електророзвідувальних досліджень у межах шахтного поля рудника №2 Стебницького калійного родовища

## Геолого-геофізична ситуація

Стебницьке родовище калійних солей знаходиться у північно-східній частині Передкарпатського прогину у басейні р. Тисмениця у західній частині м. Стебник. Поклади солей тут приурочені до верхньоворотищенської світи, яка представлена кам'яною сіллю, глинами, алевролітами, пісковиками з окремими пластами і лінзами калійних солей.

Гідрогеологічні дослідження, проведені у різні роки на Стебницькому родовищі калійних солей, свідчать, що найбільш водопроникними є гіпергенно змінені корінні відклади воротищенської світи у межах „соляного дзеркала”. Серед різних типів галогенних порід найвищими фільтраційними властивостями характеризуються ті, що представлені полімінеральним сольовим складом [Павлюк 2016]. Це можна пояснити тим, що під час підземного вилуговування солей у зоні “соляного дзеркала” в породах, які ще зберігають загальну власну структуру, формуються кавернозні пустоти внаслідок неоднорідного розчинення мінералів, що створює умови для зростання водопроникності відкладів. Максимальні фільтраційні показники відкладів, розміщених над калійними пластами, зумовлені різним ступенем розчинності складного комплексу солей, коли, насамперед, розчиняються зерна галіту та інші більш розчинні соляні мінерали, що створює відносно пористе середовище. Так само і водопроникність гіпсо-глинистої шапки (ГГШ), яка є відображенням будови корінних солевмісних порід, не характеризується стабільними показниками, а різко змінюється в плані та розрізі. Тут часто характерна вергентність тектонічних форм з кутом нахилу з північного заходу на південний схід. Такі неоднорідності створюють своєрідні відносно більш водопроникні „канали” у товщі „соляного дзеркала” та ГГШ. Породи ГГШ та солевмісні відклади, які містять ці “канали”, є майже водонепроникними, з меншими в десятки і сотні разів фільтраційними властивостями [Павлюк 2012]. Тому, прогнозуючи розвиток карстових порожнин на північно-західному фланзі Стебницького родовища, від долини р. Вишниця до місця прориву поверхневих вод у підземні виробки в камерах 115 і 122 рудника № 2, а також величину мінералізації розсолів, які в них потрапляють (середня мінералізація приблизно 300 г/дм<sup>3</sup>), можна стверджувати, що основний об'єм карстових порожнин сформувався на ділянці між річкою Вишниця й автотрасою Східниця–Пісочне. Усі вони розміщені вздовж геологічних границь воротищенської світи, у межах „соляного дзеркала” над калійними пластами (за напрямком найменшого гідралічного опору), які мають тут північно-західне простягання.

Вище за розрізом породи верхньоворотищенської світи перекриті елювіальними відкладами гіпсо-глинистої шапки, яка утворилась внаслідок вилуговування солей і представлена глинами, гіпсами, частково супісками та брекчіями пісковиків. Потужність гіпсо-глинистої шапки від 20 до 120 метрів. Вміст гіпсу ангідритового компонента (від 20 до 60 %), а засоленість може сягати від 1,3 до 43%. В межах подошви ГГШ та кривлі воротищенської світи розвинута зона вилуговування – надсольові води. Верхня частина представлена четвертинними відкладами суглинків та піску.

## Мета

Метою роботи є виявлення потенційно екологічно небезпечних карстопровальних зон та прогнозування розвитку карсту на ділянці автодороги Східниця–Пісочне у межах впливу полів рудника №2 Стебницького родовища калійної солі електророзвідувальним методом зондувань становленням електромагнітного поля (ЗС).

## Методика

### Теоретичні передумови

Для визначення зон розвитку карстових, суфозійно-фільтраційних процесів застосовуються переважно геофізичні методи. Особливою ефективністю для виявлення особливостей будови геологічного середовища та моніторингових досліджень в умовах Передкарпаття відзначається метод зондувань становленням електромагнітного поля у ближній зоні.

Для вирішення актуальних інженерно-геологічних, екологічних задач щодо оцінки стану середовища верхньої частини геологічних розрізів, виявлення і вивчення динаміки негативних процесів (карстових, фільтраційно-суфозійних, зсувних, забруднення підземних вод), які переважно розвиваються на глибинах до 100-200 м, Карпатським відділенням ІГФ у 90-х роках створено, опрацьовано на проблемних територіях регіону (Яворів, Стебник, Калуш та ін.) [Дешиця, Шамоко, 2005] і в подальшому модернізовано апаратно-програмний швидкодіючий комплекс, який дозволяє виконувати малоглибинні класичні електромагнітні (ЕМ) зондування геологічного середовища у ближній зоні джерела поля і модифікації методу на максимально високих частотах, коли струмами зміщення ще можна нехтувати. За просторовим розподілом електропровідності упевнено виділяються усі важливі елементи відповідних геологічних розрізів, а також і зміни, зумовлені процесами деградації чи консолідації середовища.

Екологічно небезпечні геологічні процеси, зумовлені природними та техногенними факторами, переважно розвиваються у

приповерхневих геосередовищах і охоплюють глибини до 200 м. На відпрацьованих шахтних полях рудників активізація карстових процесів призводить до втрат стійкості покривної товщі порід над гірничими виробками та утворення провальних ліжок [Дешиця та ін., 2016]. Процеси розущільнення, фільтрації, суфозії у ґрунтах дамб і гребель супроводжуються послабленням міцності структурних зв'язків ґрунту, пониженням стійкості і прориву споруд. Надмірне зволоження порід, перевантаження та підрізки схилу активізують зсуви у гірських районах. Згаданим процесам відповідають специфічні геоелектричні умови, які визначають вимоги до технічних характеристик апаратури, призначеної для виявлення і вивчення таких процесів.

На початковій стадії розвиток згаданих негативних процесів (розущільнення, підвищення фільтрація і т. п.) не приводить до відчутних змін фізико-механічного стану середовища, але суттєво

впливає на електрофізичні характеристики останнього. Так, відносно невеликі зміни об'єму порового простору приповерхневих ґрунтів на 1–5% супроводжуються зміною питомої електропровідності на 35–70%. Внаслідок розвитку негативних процесів у активній області виникають просторово співпадаючі з нею електричні неоднорідності. Точне, на рівні кількісних характеристик, визначення електричних параметрів та геометричних характеристик утворених неоднорідностей дає змогу адекватно інтерпретувати дані натурних (польових) спостережень, визначити ступінь і масштаби деградації досліджуваних геосередовищ. У таблиці 1 показані типові геоелектричні умови щодо окремих об'єктів, визначені на основі наявних польових матеріалів, отриманих методом ЗС у модифікації „контур у контурі” з генераторним контуром  $Q$  та приймальним  $q$ .

Таблиця 1

Типові параметри геосередовища проблемних об'єктів

№ п/п	Екологічно небезпечні процеси. Об'єкти пошуку	Параметри пошукових об'єктів			Оптимізовані параметри установок (м <sup>2</sup> )
		H, глибина залягання (м)	h, потужність (м)	$\rho$ , питомий опір (Ом·м)	
1	Сольовий карст (Калуш, Стебник). Порожнини.	20–60	>5	0,5–20	$Q = 60 \times 60$ , $q = 30 \times 30$
2	Ґрунти дамб хвостосховищ (Калуш, Стебник). Розущільнені ділянки.	2–30	0,5–10	1,2–10	$Q = 10 \times 10$ , $q = 5 \times 5$
3	Сульфатний карст (Новояворівськ, Львівської обл.). Порожнини.	25–40	3,5–10	2,3–20	$Q = 30 \times 30$ , $q = 20 \times 20$
4	Ореоли забруднення (Калуш). Зони аномальної провідності.	0,5–20	0,5–10	0,5–2,5	$Q = 10 \times 10$ , $q = 5 \times 5$
5	Зсуви (Воловець, Копашнево, Закарпатської обл.). Шар динамічних деформацій.	2,5–10	0,5–2,5	2,5–10	$Q = 5 \times 5$ , $q = 3 \times 3$

Для виявлення і моніторингу екологічно небезпечних явищ вже давно широко використовуються та вдосконалюються методи постійного струму [Loke, 2014; Stacey Robert W., 2006]. Вони здебільшого базуються на стандартній апаратурі, геометричних зондуваннях геосередовища електричними установками (наприклад, типу А-М-Н-В) різних розмірів та періодичних вимірюваннях позірної опору ( $\rho_k$ ) і його змін з часом на потенційно небезпечних ділянках. Але через низьку роздільну здатність та локальність, класичні методи постійного струму дають обмежену інформацію про просторові характеристики досліджуваного процесу, оскільки підповерхнева частина геологічних розрізів є найбільш неоднорідною за структурою та електричними властивостями. Високу роздільну здатність мають георадарні системи [Kioto Lizuka, 1984]. Їх принцип дії ґрунтується на розчленуванні геологічного середовища з

різним опором і діелектричною проникністю за відбитими високочастотними електромагнітними сигналами. За сприятливих умов над високоомними середовищами (сухі ґрунти, вічна мерзлота і т.п.) глибинність зондування кращими георадарами може сягати 20–30 м і більше, зате в умовах зволжених глин і суглинків максимальна глибина зондувань внаслідок зростання електропровідності середовища не перевищує 6–10 м. При високій мінералізації зволожуючої рідкої фази їх застосування стає неможливим.

У 70-х роках минулого століття був розроблений метод електромагнітних зондувань, придатний для розчленування товщі з низькоомними і високоомними горизонтами, непроникними для постійного струму [Сидоров, 1969], його можливості до сьогодні далеко не вичерпані. На сьогодні є значний позитивний досвід використання згаданих розробок у розв'язанні практичних, переважно інженерно-

геологічних та екологічних завдань, який підтверджує високу геологічну інформативність та ефективність методу електромагнітних зондувань.

Поряд з розробленим апаратурним комплексом обстеження верхньої частини геологічних розрізів застосовується стандартна апаратура для глибинних зондувань („Імпульс 3М”), що на основі отримання електричних параметрів геологічного середовища дозволяє вирішувати низку завдань:

- виявлення і картування зон формування екологічно небезпечних ділянок над гірничими виробками і за їх межами на всій території гірничого відводу;

- визначення ступеню закарстованості і виділення найбільш небезпечних ділянок, на яких імовірні прориви надсолених вод і розсолів у гірничі виробки, просідання ґрунтів, розвиток суфозійно-карстових процесів;

- вивчення динаміки розвитку екологічно небезпечних процесів для прогнозування і попередження катастрофічних явищ.

Успішне вирішення цих завдань досягається впровадженням технології електромагнітного діагностування геосередовищ і прогнозування екологічно небезпечних процесів (техногенного карсту), яка базується на імпульсних зондуваннях геологічних розрізів у ближній зоні джерела електромагнітного поля, комплексуванні польових (натурних) спостережень з математичним та фізичним моделюванням складних геоелектричних ситуацій.

На початковій стадії розвитку негативних процесів (карстових, фільтраційно-суфозійних, зсувних тощо), коли зниження міцності структурних зв'язків та деформації ґрунту ще не відчутні і не реєструються прямими (п'єзометрія) методами, у зародкових потенційно небезпечних областях геологічного середовища вже відбуваються істотні зміни його електричних характеристик. Зокрема, зростає електропровідність цих областей внаслідок збільшення проникливості та насичення середовища мінералізованими водами. Такі аномалії електропровідності є основними пошуковими об'єктами електрометричних методів при обстеженні екологічно проблемних територій з метою оцінки їх стану, виявлення та вивчення небезпечних геологічних процесів для своєчасного застосування запобіжних заходів.

Загалом узагальнена геоелектрична модель верхньої частини розрізу є не складною, відповідає тришаровому розрізу ( $\rho_1 \geq \rho_2 \leq \rho_3$ , де  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – питомі опори шарів). Верхній шар представлений гальково-суглинковими відкладами потужністю 10–20 м з електричним опором 30–40 Ом·м. Нижче залягають низькоомні (0,6–5 Ом·м) алювіальні утворення глинисто-гіпсової шапки потужністю 10–100 м, насичені

розсолами, що циркулюють над високоомними (>200 Ом·м) корінними соленосними відкладами. Останні представлені калійною і галітовою породами, соленосною брекчією. Ситуація ускладнюється наявністю розуцільнень покривної товщі. Такі області проявляються як локальні або протяжні геоелектричні неоднорідності над відпрацьованими і заповненими розсолами камерами. З часом це призводить до втрат стійкості покривних порід над гірничими виробками, утворення провальних воронок та раптового просідання земної поверхні. Початок розвитку таких процесів переважно зумовлює ослаблена стеліна та розуцільнені ділянки водозахисної товщі над видобувними камерами. З часом обвалення порід поширюється (вверх), притому до розвитку фільтраційно-карстових процесів можуть залучатись інші раніше неактивні локальні та протяжні структурно-речовинні неоднорідності глинисто-гіпсової шапки, а також відклади водоносного горизонту, що призводить до масштабних екологічних проблем та значних матеріальних збитків. Поза тим, технологічно передбачене просідання поверхні і утворення мульд над шахтними полями при перевищенні планових норм стає надзвичайно потужним джерелом забруднення водоносного горизонту високо мінералізованими водами, витісненими з камер.

Особливістю сольового карсту порівняно з іншими типами (сульфатний, карбонатний) є здатність багатократно прискорювати протікання негативних процесів під впливом низки факторів. Поряд з техногенними чинниками, фізико-хімічними властивостями речовинного та фаціального складу, характер і динаміка розвитку карстових процесів визначається структурно-тектонічними особливостями будови соленосних відкладів [Павлюк, 2012], зокрема, висока складчастість і численні диз'юнктивні порушення вздовж та впоперек простягання основних структур, круте (аж до вертикального) залягання пластів солей, що прискорюють розвиток негативних екзогенних геологічних процесів. Систематичний електромагнітний контроль (моніторинг) стану геологічного середовища покривної товщі дозволяє прогнозувати та своєчасно попереджувати негативні та катастрофічні явища. Оцінки стану геосередовища над шахтними полями доцільно проводити на всіх етапах експлуатації рудника та по її завершенню.

### **Методика і техніка польових робіт**

Для вирішення поставлених завдань добре зарекомендував себе метод зондувань становленням електромагнітного поля у ближній зоні. До найбільш ефективних його модифікацій належить так звана установка „контур у контурі”, коли всередині контуру Q, що збуджує електромагнітне поле, розташовується



приймальний контур  $q$ , що вимірює сигнал індукованого електромагнітного поля  $E(t) = \partial B_z / \partial t$  похідну за часом  $t$  вертикального компоненту потоку магнітної індукції  $B_z$  через вимірювальний контур.

Для проведення спостережень у верхній частині розрізу (до 100 м) застосовано цифрову електророзвідувальну апаратуру мікросекундного діапазону “Стадія” (розробки Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України) у модифікації „контур у контурі” з геометричними розмірами генераторного  $Q$  та вимірювального  $q$  контурів:  $Q = 30 \text{ м} \times 30 \text{ м} = 900 \text{ м}^2$ ,  $q = 20 \text{ м} \times 20 \text{ м} = 400 \text{ м}^2$  відповідно, що забезпечувало на ділянці зондування геологічного середовища глибиною від 10–15 м до 60–80 м у часовому діапазоні вимірювань нестационарного електромагнітного поля від 5–6 до 900 мкс з кроком дискретизації, що поступово зростав з глибиною від 1 до 100 мкс. Для отримання даних про саму верхню частину розрізу (від 2–3 м) використано установку з геометричними розмірами контурів  $Q = 10 \text{ м} \times 10 \text{ м} = 100 \text{ м}^2$ ,  $q = 5 \text{ м} \times 5 \text{ м} = 25 \text{ м}^2$ . У такому діапазоні метод ЗС характеризується досить високою роздільною здатністю, що забезпечує виділення електрично неоднорідних об’єктів геологічного середовища з хорошою деталістю та достатньою глибинністю для верхньої частини геологічного розрізу.

Для отримання інформації про глибшу частину геологічного середовища (від 50–100 м до 300–400 м) використано цифрову електророзвідувальну станцію „Імпульс 3М” (Росія) із застосуванням модифікації „контур у контурі” з геометричними розмірами квадратних генераторної  $Q = 125 \text{ м} \times 125 \text{ м} = 15625 \text{ м}^2$  та приймальної петель  $q = 20 \text{ м} \times 20 \text{ м} \times 27$  витків  $= 10800 \text{ м}^2$  з вимірюванням корисного сигналу у діапазоні від 501 мкс до 39,8 мс з геометричним кроком рівним приблизно 1,12 (всього 39 відліків).

Обробка та інтерпретація даних зондувань ґрунтується на застосуванні програмних засобів препроцесингу та трансформації вимірних сигналів у геоелектричні параметри середовища, а також методиках візуалізації та геологічної інтерпретації даних зондування. За основу інтерпретації зондувань використано диференційні способи трансформації індукованого поля за алгоритмами Сідорова В. А. [Сидоров, 1969] програмним пакетом Мамонтова В.І. з подальшим представленням кривих залежностей сумарної електропровідності  $S = f(H)$  та електричного опору  $\rho = f(H)$  від глибини  $H$ .

Загалом використання таких типів установок забезпечує отримання геоелектричної інформації про геологічне середовище починаючи від декількох метрів до 300–400 м. Вибрані установки при таких вимірюваннях виконаних на одному пікеті не тільки забезпечують отримання

неперервних даних на всій глибині досліджень, а й, враховуючи перекриття різних діапазонів спостережень ЗС, дозволяє підвищити достовірність отриманих результатів.

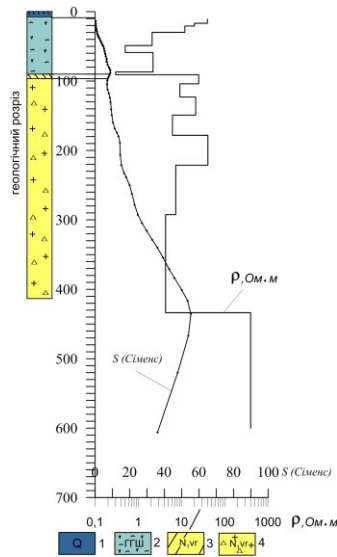
Незважаючи на можливість розділення гірських порід за їх електричними властивостями (опором чи оберненою величиною – провідністю), все ж залишаються суттєві неоднозначності визначення тих чи інших порід за значеннями їх електричного опору внаслідок його суттєвих змін для тих самих порід у різних фізичних і геологічних умовах. Тому методично польові електророзвідувальні спостереження методом ЗС складаються з трьох етапів.

1. Проведення параметричних зондувань для конкретної ділянки поблизу свердловин з відомим геологічним розрізом та електричними характеристиками з метою в конкретних геологічних умовах з’ясувати можливості методу з розчленування геологічних горизонтів та їх прив’язки до параметрів електричного опору та провідності.
2. Виконання зондувань вздовж визначених профілів з кроком, що забезпечує необхідну детальність та роздільну здатність спостережень.
3. Побудова за їх результатами геоелектричних розрізів та карт з прив’язкою до літології району робіт, виділенням структурних та тектонічних особливостей ділянки досліджень та аномальних зон. Виконання за необхідності додаткових зондувань з метою уточнення параметрів виділених зон.

### **Результати**

Відповідно до відпрацьованої методики на першому етапі спостережень для виділення відповідності літологічних границь та визначення позірною опорю порід проведено параметричні дослідження над свердловиною №137, що дало можливість визначити параметри гіпсоглинистої шапки і контакту надсольових вод. Доповненням до свердловини на більші глибини стали результати літературних джерел [Павлюк, 2012; Гайдін та ін., 2014]. Спостереження проводились двома типами установок. Результати зондувань цими установками у районі свердловини №137 показали хорошу роздільну здатність методу (рис. 2). Співставлення даних методом ЗС трансформованих у параметри середовища з даними буріння показали, що такими типами установок ми можемо отримати результат з глибин від 14 метрів і до 600 метрів, що цілком достатньо для аналізу геологічного розрізу району. За параметричними спостереженнями біля свердловини було визначено електричні опори, які дозволяють при профільних спостереженнях робити не тільки літологічне розчленування

геоелектричного розрізу і їй визначати в якому стані вони перебувають (табл. 2).



**Рис. 2.** Результати спостережень методом ЗС на параметричній свердловині №137

1 – четвертинні відклади; 2 – відклади гіпсоглинистої шапки: глини, гіпси, супіски, брекчія, пісковики; 3 – провідна зона надсолевих вод; 4 – відклади воротищенської світи: калійні та кам'яна солі, глини, алевроліти, пісковики

Профільні спостереження виконано по обидва боки дороги приблизно у напрямку північ-південь загальною кількістю 81 зондування: 44 глибинних (профіль I–I, пікети (ПК) S1-1–S1-23, профіль II–II, ПК S2-1–S2-21) та 37 малоглибинних (профіль I–I, ПК d1–d19, профіль II–II, ПК d20–d37). Крім того, зроблено 15 уточнюючих малоглибинних зондування – ПК a1–a11, b1–b4 (рис. 3).

### Результати малоглибинних зондувань (дослідження гіпсоглинистої шапки)

За результатами малоглибинних зондувань, виконаних вздовж профілю I–I (рис.3,б) зроблено розчленування розрізу з глибини 4 метри, а максимальна глибини сягає 100 метрів.

Результати показали, що підосва гіпсоглинистих відкладів (ГГШ) знаходиться на абсолютній відмітці 260-240 метрів. За параметрами опору розріз витриманий майже по всій довжині профілю, а ось по глибині сильно диференційований і ділиться на дві зони: верхня високоомна, опір її складає 10–40 Ом·м і нижня провідна 5–10 Ом·м. Це говорить про те, що верхня частина ГГШ є слабо зволожена поверхневими прісними водами, а нижній частка розчинених солей у ґрунтових водах, що заповнили слабо проникні породи ГГШ складає від 10 до 50 г/л. Тільки в окремих пунктах концентрація перевищує 50 г/л на що вказує низьке значення опору менше 1 Ом·м. Смуга низького опору вздовж усього профілю у провідній зоні ГГШ свідчить, що рівень ґрунтових вод знаходиться на абсолютній відмітці 305 метрів. У межах пунктів спостережень ПК d2-d3 з абсолютної відмітки 334 метри виділяється аномально провідна зона (опір < 1,0 Ом·м) у північній частині профілю, товщиною 14 метрів та на ділянці ПК d7-d8 на відмітка 314 метрів і товщиною 10 метрів. Обидві зони у цих пунктах між собою з'єднані утворюючи аномалію провідності з кутом падіння з півночі на південь. Для деталізації виявленої на профілі I–I аномально провідної зони було проведено додаткові спостереження вздовж профілів III–III та IV–IV (рис. 4,а–4,в).

Таблиця 2

### Відповідність геологічних горизонтів та їх питомих електричних опорів

Назва порід	Характеристика порід	опір (Ом·м)
Четвертинні відклади	Не визначались	-
ГГШ	сухі	50-100
-//-	Зволожені водами долею вмісту розчинених солей 1-10г/л	8-50
-//-	Зволожені водами з долею вмісту розчинених солей 10-50 г/л	1,5-8
-//-	-//- від більше 50 г/л	< 1,0
воротищенська світа N <sub>1</sub> vg	обводнені	5-20
-//-	Розущільнені, камери заповнені водою	40-100
-//-	щільні, непроникні	> 400



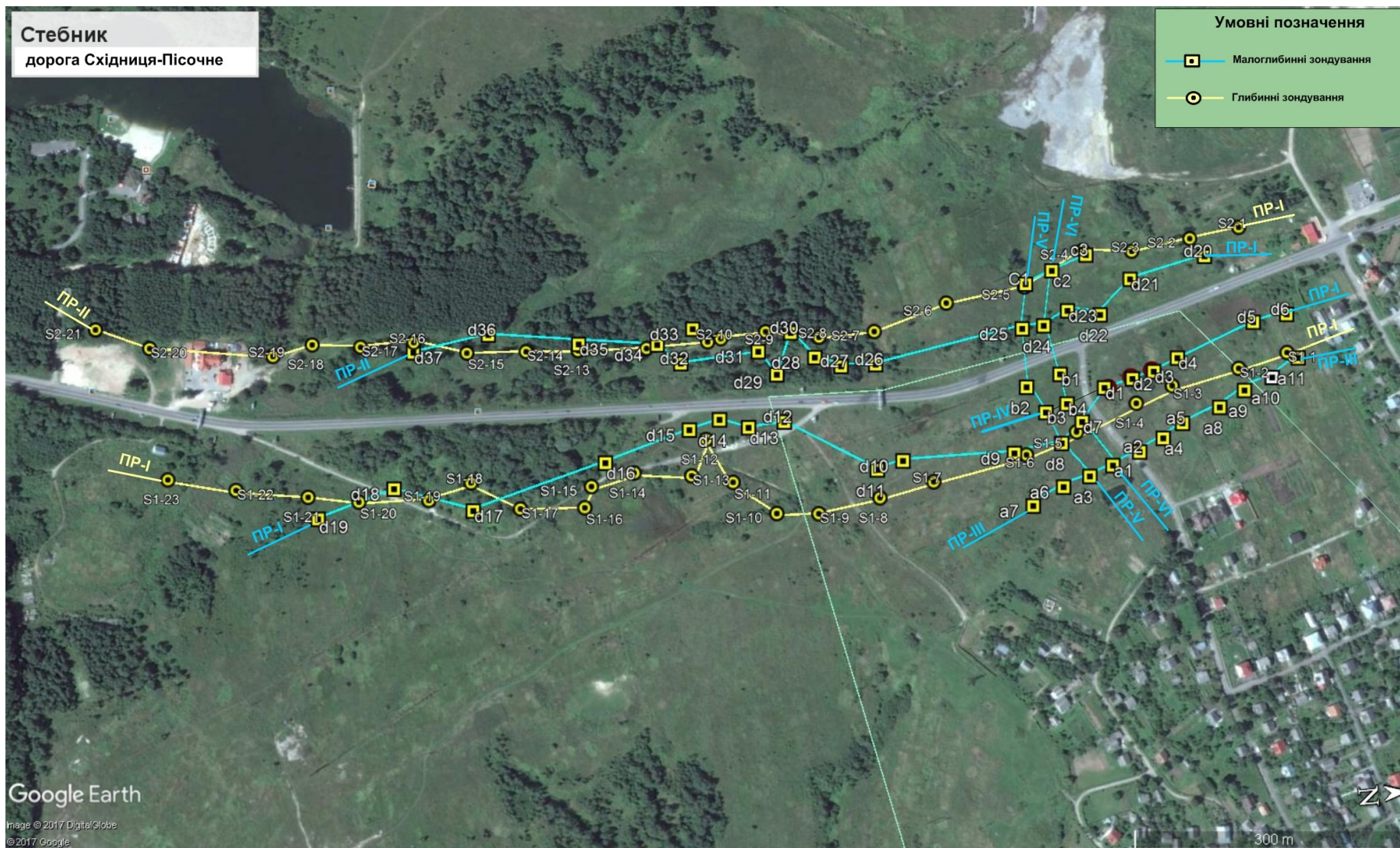


Рис. 3. Розташування профілів та пікетів ЗС вздовж автодороги Східниця–Пісочне



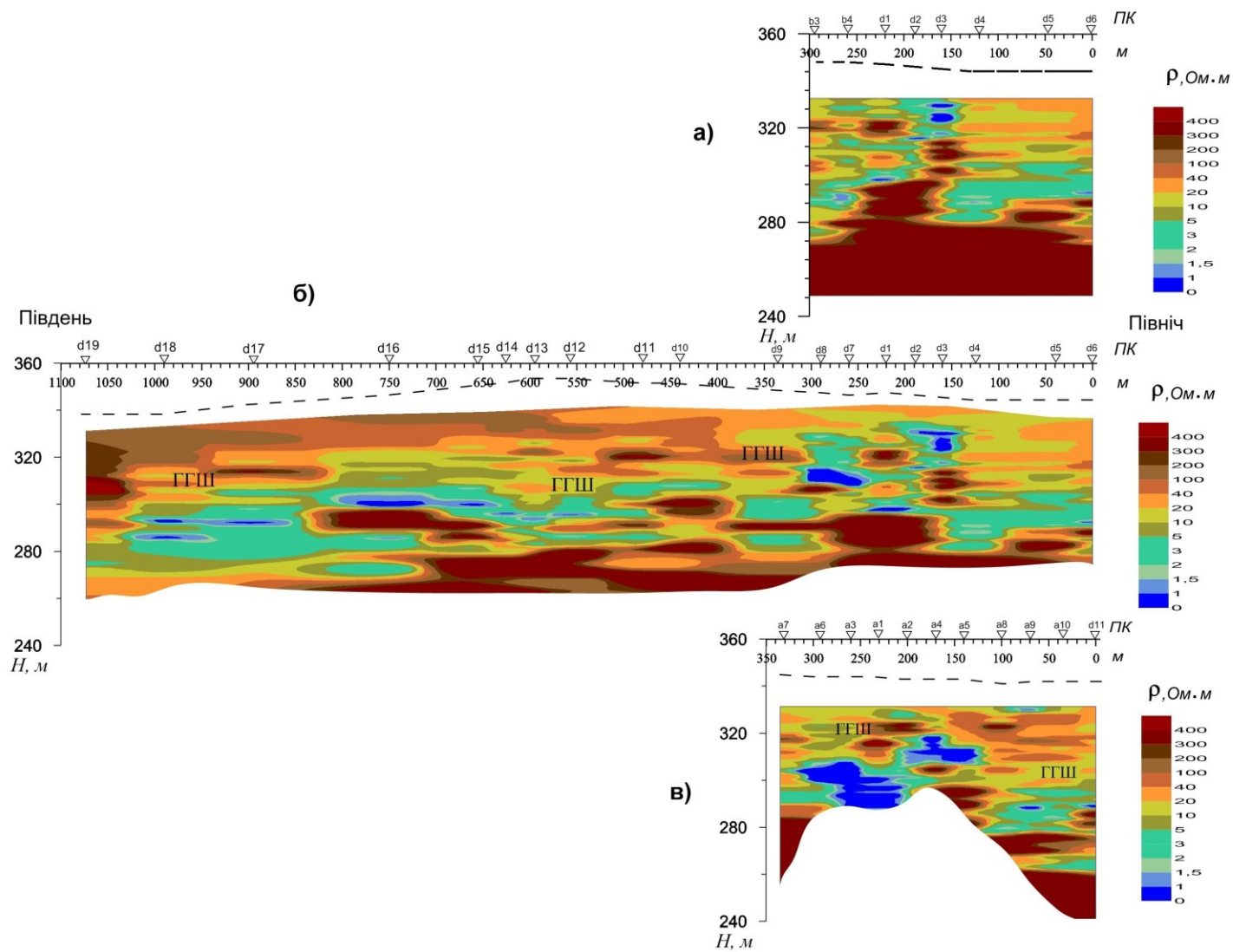
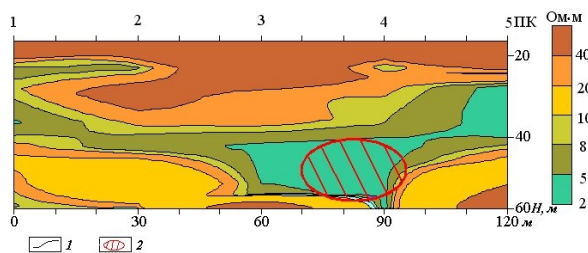


Рис. 4. Геоелектричні розрізи вздовж автодороги Східниця–Пісочне: а) профіль IV-IV; б) профіль I-I; в) профіль III-III

Результати показали, що аномалія проявляється на усіх трьох профілях і заглиблюється у південно-східному напрямку паралельно простяганню і заляганню соляних пластів. Скоріш за все таку аномалію можна пов'язати з суфозійно-фільтраційним процесом, в якому відбувається не тільки перенесення солей на нижчі гіпсометричні рівні, але ймовірно перевідкладення частин гіпсоглинистого матеріалу.

Ця аномальна зона була виявлена нами за результатами спостережень ще у 2009 році (рис. 5). Як бачимо, у порівнянні з 2017 відбулося збільшення провідності гірських порід що вказує на деградацію середовища за розглянутий період. Профіль II-II знаходиться на західній стороні дороги Східниця-Пісочне і проходить з півночі на південь, довжина його складає 855 метрів. Велика частина профілю проходить у зоні розташування лінії електричних передач, трубопроводи, підземні силові та телефонні лінії із-за чого результати виявились непридатними для обробки. Хоча у північній частині профілю вдалось таки виділити невелику аномалію провідності при абсолютній відмітці 325 метрів (16 метрів від поверхні).



**Рис. 5.** Геоелектричний розріз за результатами спостережень 2009 року – відповідає малоглибинному профілю I-I 2017 року, ПК d1-d4  
1 – ізономи; 2 – аномальна зона

#### **Результати глибинних зондувань (дослідження воротищенської світи)**

Профіль I-I (ПК s1-1-s1-23), на якому виконані глибинні зондування, розташований вздовж східної сторони дороги Східниця-Пісочне і проходить з півночі на південь. Довжина його складає 1255 метрів (рис. 6). Розріз охоплює абсолютні відмітки від 296 метрів і до -100 метрів (глибини від 50-70 метрів).

Відклади воротищенської світи суттєво відрізняються за значенням опору починаючи із глибин, що граничать з підшовою ГГШ і до абсолютної відмітки 160 метрів. Верхня частина є більш провідною і має значення опору від 20 до 100 Ом·м, а нижче відмітки 160 метрів опір підвищується від 100 до 400 Ом·м. Такого не спостерігається у красвій області профілю, де він

виходить за межі контуру мульди. Це вказує на те, що ця область в основному задіяна і зазнала змін внаслідок просідання.

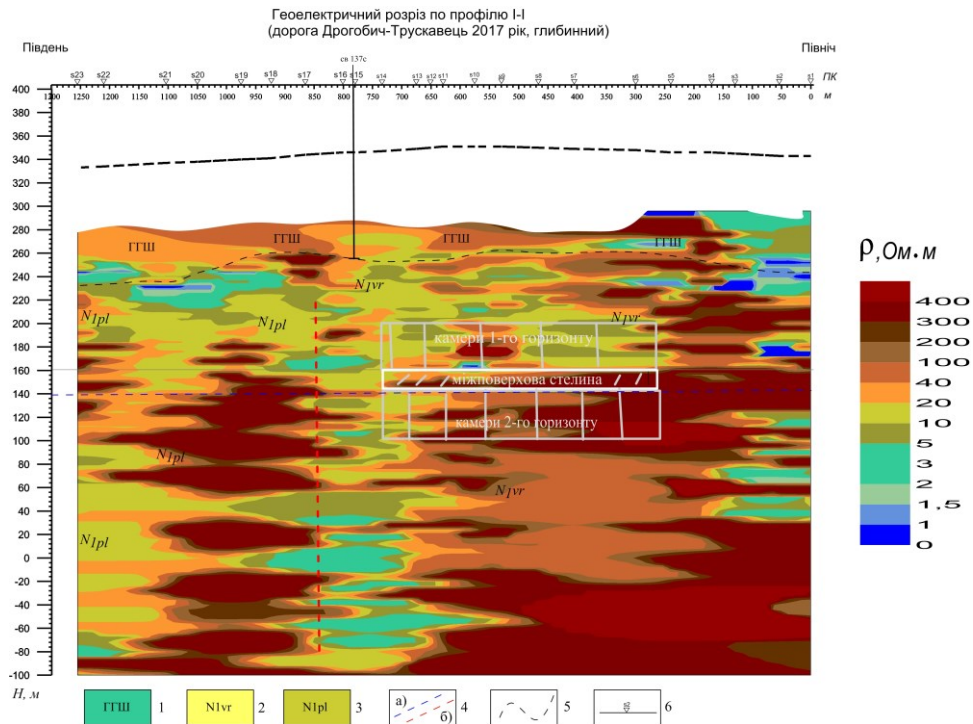
На відмітці від 285 метрів до 225 метрів (глибина 80-120 метрів) виділяється підшва гіпсоглинистої шапки опір якої складає 10-40 Ом·м. Вздовж границі підшви ГГШ у кривлі воротищенської світи виділяється малопотужна зона провідності 2-10 Ом·м, в окремих випадках 2-5 Ом·м, пов'язана з надсолевими водами. Відклади воротищенської світи загалом є електрично неоднорідними. На ділянці профілю в межах пікетів від ПК s1-6 і до s1-14 на глибині 200 метрів за абсолютними позначками розташовані шахтні виробки (рис. 7). Над виробленими камерами товща воротищенських відкладів складає 48-60 метрів. У межах пункту зондувань ПК s1-10 виділяється локальна провідна зона, яка сягає гірничих виробок і можливо пов'язана з інфільтрацією надсолевих вод у них.

Нижче гірничих виробок за даними зондувань відклади воротищенської світи виявляються як консолідоване середовище з питомим опором 40-100 Ом·м.

З південної сторони гірничих виробок, електромагнітними зондуваннями (ПК s1-13-s1-17) виділяється потужна провідна область, що відстежується починаючи від підшви ГГШ до значних глибин, яка ймовірно пов'язана із структурними особливостями будови, так як аномалія проходить вздовж тектонічного порушення, що розділяє накопичення воротищенської світи від відкладів поляницької світи. Величина аномальної зони підсилюється зокрема екзогенними процесами, які відбуваються на границі покладу.

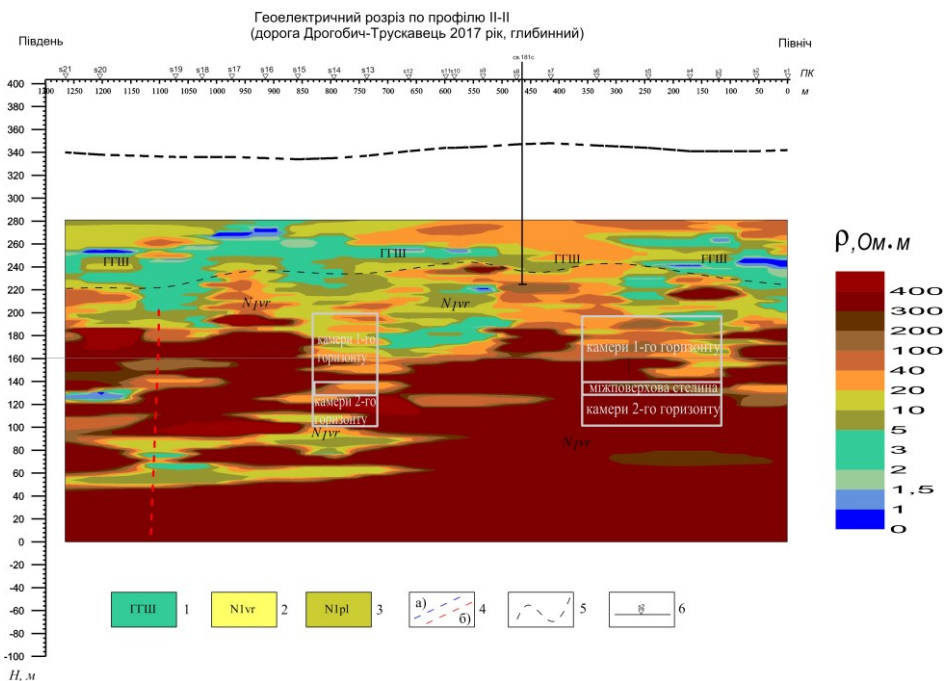
Подібна ж аномалія за результатами електромагнітних зондувань виділяється і в північній стороні профілю на ділянці ПК s1-1-s1-4. Інтенсивність цієї аномально провідної зони збільшується у північному напрямку і пояснюється екзогенними процесами які протікають на границі покладу. З південної сторони на профілі в межах ПК s1-18 та s1-21 виділяється достатньо велика аномалія провідності на глибинах з абсолютною відміткою 232-242 метри. Аномальна зона розміщена в межах поширення мульди де відмічено просідання денної поверхні понад 1,2 метра.

У її південній красвій частині простежується порушення в осадконакопиченнях поляницької світи поблизу ПК s1-17, яке пов'язується з мульдою просідання [Кузьменко та ін., 2017]. Сама аномалія провідності витягується на північ (північний-схід) у бік потужної глибинної аномалії, що описана вище і пов'язана з екзогенними процесами на границі рудного тіла.



**Рис. 6.** Геоелектричний розріз за результатами глибинних зондувань вздовж профілю I–I  
 1 – відклади гіпсо-глинистої шапки; 2 – відклади воротищенської світи; 3 – відклади поляницької світи; 4 – літологічні межі; 5 – денна поверхня; 6 – пункти спостережень

**Fig. 6.** Geoelectric cross-section for deep soundings along the profile I–I  
 1 – GCC sediments; 2 – Vorotytscha suite sediments; 3 – Polyanytsia suite sediments; 4 – lithological boundaries; 5 – Earth’s surface; 6 – OP



**Рис. 7.** Геоелектричний розріз за результатами глибинних зондувань вздовж профілю II–II  
 1 – відклади гіпсо-глинистої шапки; 2 – відклади воротищенської світи; 3 – відклади поляницької світи; 4 – літологічні межі; 5 – денна поверхня; 6 – пункти спостережень

Профіль II-II (ПК s2-1–s2-21) знаходиться на західній стороні дороги Східниця–Пісочне і проходить, довжина його складає 1265 метрів. Розріз охоплює абсолютні відмітки від 280 до 0



метрів (від 70 метрів і до глибин понад 350 метрів).

Відклади воротищенської світи суттєво, як і на попередньому профілі, відрізняються за значеннями опору починаючи із глибин, що межують з підшовою ГГШ і до абсолютної позначки 160 метрів.

Верхня частина є більш провідною і має значення опору від 20 до 100 Ом·м, а нижче абсолютної відмітки 160 метрів опір підвищується від 100 до 400 Ом·м. Винятком є південна сторона розрізу де значення пониженого опору досягають рівня до 180 метрів. Це пояснюється тим, що південна сторона профілю є у краєвій частині мульди просідання.

На відмітках 220 метрів і 240 метрів (глибина 90–110 м) виділяється підшова гіпсоглинистої шапки опір якої складає 2–40 Ом·м. У межах ГГШ значна область розрізу має понижений опір у межах 2-5 омометрів, що відповідає обводненості відкладів горизонту. Надсольові води вздовж границі підшови ГГШ у кривлі воротищенської світи практично не виділяються, можливо із-за їх малої потужності.

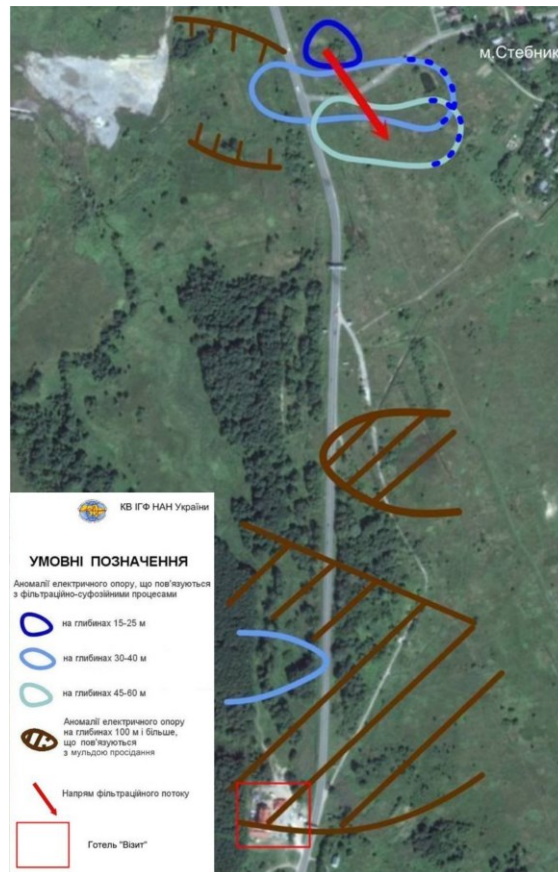
На ділянці профілю в межах пікетів ПК s2-13–s2-14 та ПК s2-3–s2-5 на глибині 200 метрів за абсолютними позначками розташовані шахтні виробки. Над виробленими камерами товща воротищенських відкладів складає 50–60 метрів. Локальні аномалії провідності, які знаходяться безпосередньо над гірничими виробками у ПК s2-13–s2-15 та за її межами у пунктах зондування ПК s2-17 та s2-18 ймовірно зумовлені структурними особливостями (розлом) та впливом мульди просідання. Аномалія, яка безпосередньо розташована над гірничими виробками, суттєво зменшила захисні властивості захисної товщі до 20–30 метрів.

Отже, проведені дослідження виявили у північній частині ділянки поверхневу аномалію електропровідності, що знаходиться безпосередньо біля автодороги, охоплює значну територію і пов'язується з фільтраційно-суфозійними процесами. У південній частині геоелектричних розрізів відзначається глибинна аномалія електричного опору ймовірно пов'язана з мульдою просідання і безпосередньо проходить під дорогою Східниця–Пісочне. Межі аномальних зон винесені на схематичну карту (рис. 8).

### Наукова новизна

Досліджено можливості методу становлення електромагнітного поля для вивчення карстопровальних процесів на території Стебницького родовища калійної солі. Вперше за допомогою електророзвідувальних методів зроблено оцінку стану геологічного середовища у межах шахтного поля рудника №2 Стебницького родовища калійної солі на ділянці автодороги Східниця–Пісочне. Показано, що методом ЗС при

комплексуванні двох типів установок різної глибинності дозволяє детально діагностувати геологічне середовище у діапазоні глибин від 10 до 400 м з виділенням зон аномального електричного опору, що пов'язуються з суфозійно-фільтраційними процесами.



**Рис. 8.** Схема розміщення аномальних зон за результатами електромагнітних зондувань на ділянці вздовж автодороги Східниця – Пісочне

За результатами електромагнітних спостережень на ділянці автодороги Східниця–Пісочне у межах шахтних полів рудника №2 Стебницького родовища калійних солей виділено зони, охоплені фільтраційно-суфозійними процесами. Зазначені зони є першочерговими об'єктами, які повинні бути предметом пильної уваги для подальшого моніторингу карстопровальних процесів, а факт їх наявності необхідно враховувати при прийнятті управлінських рішень органами влади про доцільність перенесення місць розташування автомагістралі та інших об'єктів інфраструктури.

### Висновки

Підсумовуючи результати проведені методом становлення електромагнітного поля на ділянці, прилеглої до автодороги Східниця – Пісочне, у межах південно-східної ділянки гірничого відводу

шахтного поля рудника №2 Стебницького родовища калійної солі слід зазначити наступне.

Зроблено оцінку стану геологічного середовища в інтервалі глибин від 4-х до 400 метрів. Цей інтервал глибин є достатнім для детального вивчення екзогенних геологічних процесів, що можуть впливати на стан автодороги.

За результатами спостережень поблизу автодороги виділено дві зони аномальної провідності: у північній частині ділянки досліджень та у південній.

У північній частині ділянки спостерігається поверхнева аномалія електропровідності, що охоплює безпосередньо біля автодороги та охочіть значну територію. Виявлена аномалія пов'язується з фільтраційно-суфозійними процесами, якими охоплена товща гіпсоглинистої шапки на глибинах від 10 до 50 метрів. У межах відпрацьованих електророзвідувальних профілів площа аномалії становить близько 18 тисяч квадратних метрів, а об'єм – 350 тисяч кубічних метрів. Фільтраційно-суфозійні процеси за даними зондувань направлені в сторону залягання соленосних пластів. Основна частина цієї зони знаходиться на схід від автодороги, проте вона присутня і безпосередньо під дорогою, де простежується її прояв потужністю близько 4-х метрів на глибині 33–37 метрів від денної поверхні. Оконтурення меж аномальної зони у напрямку м. Стебник потребують проведення додаткових спостережень. Як правило суфозійно-фільтраційні процеси є проявом деградації геологічного середовища з подальшим утворенням карсту.

У південній частині геоелектричних розрізів відзначається глибинна аномалія електричного опору шириною 250–300 метрів і максимальною потужністю біля 60 метрів (абсолютна висота 188–250 м). Аномалія ймовірно пов'язана з мульдою просідання і безпосередньо проходить під дорогою Східниця–Пісочне.

Визначені аномальні зони на ділянці досліджень вздовж автодороги Східниця–Пісочне вказують на наявність небезпечних процесів, які можуть призвести до її руйнування.

### Список літератури

- Гайдін, А. М., Рудько Г. І. Сульфатний карст та його техногенна активізація (на прикладі Карпатського регіону України)." *К.: Т-во "Знання". 1998. 75 с.*
- Гайдін, А. М. Геомеханіка Стебницького провалу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 2017. Вип. 2 (16). С. 101–107.
- Гайдін, А. М., Дяків, В. О., & Чікова, І. В. (2014). Деформації земної поверхні в зоні діяльності калійних рудників у Стебнику. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. Вип 2 (10). С. 112–120.
- Дешиця С. А., Шамотко В. І. Дослідження динаміки процесу карстоутворення на шахтних полях калійних рудників. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. За редакцією В.І. Старостенка. – Київ: Наукова думка. – 2005. – С. 210–232.
- Дешиця, С. А., Підвірний, О. І., Романюк, О. І., Садовий, Ю. В., Коляденко, В. В., Савків, Л. Г., & Мицишин, Ю. С. (2016). Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничо-промислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Наука та інновації*. 2016, Вип. 12(5), С. 47–59.
- Кузьменко Е. Д., Багрій С. М., Чепурний І. В., Штогрин М. В. Оцінка небезпеки приповерхневих деформацій гірських порід у межах Стебницького калійного родовища методом ПЕМПЗ. *Геодинаміка*. 2017. №1(22). С. 98–113.
- Максимчук В., Сапужак О., Дешиця С., Ладанівський Б., Романюк О., Коляденко В. Дослідження карстопровальних процесів на території Стебницького родовища калійних солей методами електророзвідки. „Геофорум-2019”. Збірник тез доповідей 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції (10–12.04.2019). Львів, В-во: НУ „Львівська Політехніка”. 2019. С. 37–38.
- Павлюк В. І. Негативні наслідки неконтрольованого затоплення Стебницького рудника калійних солей. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2012. № 1–2. С. 158–159.
- Павлюк В. І. Природні фактори активізації екзогенних процесів на техногенно порушених ділянках поширення соленосних відкладів Передкарпаття. *Геодинаміка*. 2016. № 1(20). С. 94–105.
- Сидоров В. А. Метод электрической разведки слоистых разрезов, основанный на изучении нестационарных полей вблизи источника. *Изв. АН СРСР "Физика Земли"*. 1969. № 11. С.57–65.
- Kioto Iizuka (Toronto, Canada) Subsurface radars. Proceedings of the 1984 International Symposium on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors, October 22–24, Tokyo, Japan.
- Loke, M. H. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Electronic version available from <http://www.terra.plus.com>.
- Stacey, R. W. (2006). Electrical impedance tomography. *Department of Energy and by the Department of Petroleum Engineering, Stanford University*.

V. Yu. MAKSYMCHUK<sup>1</sup>, O. Ya. SAPUZHAK<sup>1</sup>, S. A. DESHCHYTSIA<sup>1</sup>, O. I. ROMANYUK<sup>1</sup>, O. I. PIDVIRNYJ<sup>1</sup>, V. V. KOLYADENKO<sup>1</sup>, V. R. TYMOSCHUK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 79060, 3-B Naukova Str., Lviv, tel. +38(032)2648563, e-mail carp@cb-igph.lviv.ua

## EVALUATION OF KARST-CHASM HAZARD PROCESSES BY ELECTROPROSPECTING METHODS IN THE LOCATION OF STEBNYK POTASSIUM DEPOSIT

**Purpose.** The purpose of this work is definition of potentially ecologically-hazard and karst-chasm zones and prediction of karst development near the Skhidnytsya-Pisochne highway on the area of mine No.2 of Stebnyk potassium deposit by electroprospecting method, namely time domain electromagnetic method (TDEM). **Methodology.** The research was carried out using the TDEM method in the modification of “the contour in the contour”. To study the upper part of the cross-section down to 100 meters, the digital equipment for electroprospecting “Stage” was used. For information about the depths of 50-100 meters and up to 300-400 meters, a digital electric station "Impulse 3M" was used. Field observations by TDEM methodically consisted of three phases which included: sounding on parametric wells, thus clarifying electrical parameters of the geological environment; observations along defined profiles; and creation resulting of geoelectric cross sections with the reference to the lithology of the working area. **Results.** In the northern part of research area within the sediments of the gypsum-clay cap anomalous electrical conduction zones are identified. They are associated with filtration-suffusion processes. As well an anomaly was defined in the southern part of the area in the Vorotyscha suite sediments at depths greater than 100 meters, which was associated with the formation of a depression funnel. **Originality.** The possibility of the TDEM method application for the study of karst-chasm processes on the territory of the Stebnyk potassium deposit was investigated. For the first time, using the electrical prospecting methods an estimation of the state of geological environment within the mine field No. 2 of the Stebnyk potassium deposit on the area of the Skhidnytsya-Pisochne highway was made. It is shown that the TDEM method in the complexization of two types of devices with different measurement depths allowed detailed diagnosis in the geological environment in the range of depths from 10 to 400 m with the allocation of zones of abnormal electrical resistivity, which are associated with the suffusion-filtration processes. **Practical significance.** Accordingly to the results of electromagnetic observations on the area of the highway Skhidnytsya-Pisochne in the location of the mine field No.2 of the Stebnyk potassium deposit, the zones covered by the filtration-suffusion processes are defined. These zones are the primary objects that should be the subject of close attention for further monitoring of karst-chasm processes, and the fact of their availability should be taken into account when making administrative decisions by the authorities on the expediency of transferring the location of the highway and other infrastructure.

*Key words:* Stebnyk deposit; potassium salt; suffusion-filtration process; electrical prospecting; gypsum-clay cap; karst; depression.

Надійшла 29.04.2019 р.