

*Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу, м. Івано-Франківськ  
Прикарпатське державне підприємство  
“Спецгеологорозвідка” м. Івано-Франківськ*

## **ГЕОФІЗИЧНИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В ПРОЦЕСІ ЛІКВІДАЦІЇ КАЛІЙНОГО РУДНИКА “НОВА ГОЛИНЬ”**

**Актуальність.** Еколого-геологічна ситуація на площах рудників Калуш-Голинського родовища калійних солей, експлуатація якого тривала понад сотню років і припинена у 1995 р., є дуже небезпечною. Відпрацьовані рудники ліквідовуються шляхом заповнення підземних пустот високомінералізованими відходами калійного виробництва. Однак у межах рудних полів продовжуються деформації земної поверхні та утворюються карстові порожнини, є ймовірність прориву надсолених вод у гірничі виробки. Особливо загрозливі місця просідання земної поверхні в межах населених пунктів. Контроль стану геологічного середовища рудників необхідний і бажано здійснювати його за допомогою недорогих дистанційних геофізичних методів.

**Стисла геолого-тектонічна характеристика.** Калуш-Голинське родовище розташоване у межах Самбірського покриття внутрішньої зони Передкарпатського прогину, яка зірвана зі своєї основи і насунута на породи зовнішньої зони прогину. Геологічний розріз родовища складений комплексами порід стебницької ( $N_{1st}$ ) і балицької ( $N_{1bl}$ ) світ. Стебницька світа представлена різнобарвними породами, серед яких переважають глини з прошарками пісковиків, алевролітів і аргілітів. Балицька світа ділиться на дві підсвіти. На даній площі присутня тільки нижнебалицька підсвіта, яка включає глини, алевроліти, пісковики, соленосні брекчії, галітові породи і пласти калійних солей, присутні також лінзи тектонічно розсланцьованих карбонатних несоленосних глин (так звана “мидлярка”). У зоні вивітрювання порід соленосної товщі утворена водоупорна гіпсо-глиниста “шапка”, перекрита четвертинними гравійно-гальковими відкладами, з якими пов’язаний основний водоносний горизонт, та суглинками. Гіпсо-глиниста “шапка” місцями переривається виходами “мидлярки”. Води “соляного дзеркала” і карстові води утворені на контакті порід гіпсо-глинистої “шапки” і соленосних брекчій.

**Розвиток техногенного карсту** може відбуватися за рахунок руйнування ціликів порід між камерами внаслідок заповнення їх відходами калійного виробництва, просідання та обвалу стелин гірничих виробок разом із надсольовими породами, і є процесом карстоутворення у напрямку знизу вгору. А за рахунок проникнення вод основного водоносного горизонту через ослаблені зони гіпсо-глинистої “шапки” у соленосні товщі карст може розвиватися згори донизу.

Для застосування ефективних запобіжних заходів проти екологонебезпечних процесів на родовищі упроваджений геолого-геофізичний моніторинг, основними завданнями якого є своєчасне виявлення процесів карстоутворення і прогноз динаміки розвитку карстових порожнин [1].

Досвід геофізичних досліджень карстоутворень свідчить, що руйнування гірничих виробок із залученням надсольового комплексу порід (перший тип карстоутворення) картується високоточною гравірозвідкою як розвиток зон дефіциту мас на глибині 50–150 м. Вилуговування солей із соленосних відкладів (проникнення ґрунтових вод – за другим типом карстоутворення) упевнено картується електророзвідувальним методом ЗСБ (зондування становленням електромагнітного поля у ближній зоні) як розвиток зон високої електропровідності на глибині у перші десятки метрів.

**Геофізичний моніторинг** на небезпечних ділянках рудних полів за допомогою методів високоточної гравірозвідки і електророзвідки проводиться Прикарпатським державним підприємством “Спецгеологорозвідка” із науковим супроводом Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (м. Львів), Державного науково-дослідного інституту галургії (м. Калуш) і Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Польові гравіметричні спостереження виконуються способом, який відповідає принципу максимальної локальної точності [2], спосіб електрометричних спостережень методом ЗСБ обґрунтований в [1], методика інтерпретації геофізичних просторово-часових спостережень описана в [1, 3 і 4].

У цій роботі представлені результати геофізичного моніторингу стану геологічного середовища на ділянці Сівка Калуська рудника Нова Голинь (рис. 1) за 2005–2007 рр., та розглянуті деякі особливості методики інтерпретації гравіметричних даних.

**Гравіметричне моделювання змін стану геологічного середовища у часі.** Уперше методика автоматизованого рішення обернених задач гравірозвідки за просторово-часовими варіаціями поля сили тяжіння використана [4] для моделювання аномальних змін у геологічному розрізі сірчаних родовищ після підземної виплавки самородної сірки. З формальних позицій обмеження гравітаційного моделювання процесів карстоутворення є подібними:

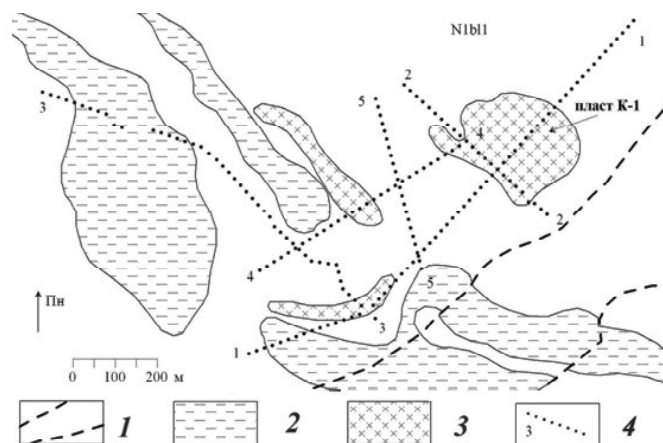


Рис. 1. Геологічна схема ділянки Сівка Калуська: 1 – лінія поперечного тектонічного порушення, 2 – карбонатна несоленосна глина (“мидлярка”), 3 – поклади калійних солей; 4 – профілі геофізичного моніторингу, їх номери

- 1) Глибина утворення локальних зон інтенсивного розвитку дефіциту мас не повинна перевищувати 100–200 м, розмір зон – бути не менше перших десятків метрів, що очевидно, бо зумовлено проблемами виділення у гравітаційному полі слабоінтенсивних аномалій та обмеженнями щодо розміру площі спостережень [5].
- 2) Якщо перепади висоти на місцевості незначні ( $\leq 0,01$  м) і пункти спостережень збережені, то здійснюючи інтерпретацію просторово-часових аномалій поправкою типу Буге можна знехтувати. Нехтування суттєвішими просіданнями поверхні призводить до помилок у визначенні інтенсивності часових варіацій поля, зумовлених появою зон розущільнення, у сторону їхнього зменшення.
- 3) Результати моделювання є більш достовірними за відсутності значних змін геологічного розрізу в області так званих бокових зон, де будова розрізу при моделюванні вважається сталою у часі.
- 4) Достовірність прогнозу карстоутворення різко зростає, якщо такі процеси очікуються у межах певних товщ та ділянок за розрізом, тобто область пошуку рішення оберненої задачі локалізована.
- 5) Моделювання змін у геологічному розрізі може відбуватися у двох варіантах з аналогічними результатами за певних умов. У першому варіанті моделювання виконується за первинними і повторними спостереженнями (часовий інтервал у спостереженнях складає декілька місяців, рік), а модель змін у розподілі густини в часі визначається просто як різниця між повторною і первинною моделями. У другому – інтерпретується лише різниця двох спостережень, тобто безпосередньо моделюються часові аномалії в розподілі значень густини. Перший варіант є коректним за умови сталого регіонального фону та тотожних параметрах процедур рішення оберненої задачі за просторовими аномаліями поля сили тяжіння. У другому варіанті є проблема

формування початкової (нульової) моделі змін у геологічному розрізі. Нульова модель у технологіях комп'ютерної системи “Complex Gravity” [4, 6] у прямому розумінні неприпустима, тому у початковій моделі слід задавати незначні умовні зміни, наприклад  $0,001 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, але тільки по товщах, де вони вірогідні.

**Параметри гравіметричного моделювання.** Точність аномалій поля сили тяжіння по профілях спостережень з кроком 20 м становить  $0,01-0,02 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. Початкові моделі розрізу родовища створені за геологічними матеріалами рудника і густинною характеристикою порід, що наведена у таблиці, та з урахуванням рівня заповнення розсолами гірничих виробок.

Регіональний фон визначений графічним способом. Дискретизація моделей по горизонталі – 5 м, по вертикалі – 1–5 м. Початкова середньоквадратична нев'язка аномального спостереженого і модельного полів –  $0,10-0,15 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. Кількість ітерацій до формально задовільного рішення оберненої задачі (кінцева нев'язка має дорівнювати або бути трохи меншою за точність спостережених аномалій) була в інтервалі 90–150. Час рішення оберненої задачі на ПК середнього класу – 1–5 хв.

Густина гірських порід Калуш-Голинського родовища калійних солей [7]

| Вік                            | Породи                     | Початкова густина,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | Прийнятий діапазон<br>густини |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Q                              | Суглинки                   | 2,1                                                     | 1,17–2,10                     |
| Q                              | Гравійно-галькові відклади | 2,20                                                    | 1,25–2,40                     |
| N <sub>1</sub> bl <sub>1</sub> | Гіпсо-глиниста “шапка”     | 2,20                                                    | 1,80–2,30                     |
| N <sub>1</sub> bl <sub>1</sub> | Глинисті сланці, аргіліти  | 2,20                                                    | 1,35–2,30                     |
| N <sub>1</sub> bl <sub>1</sub> | Соленосні глини, брекчії   | 2,30                                                    | 1,60–2,35                     |
| N <sub>1</sub> bl <sub>1</sub> | Калійна сіль               | 2,25                                                    | 1,60–2,30                     |
| —                              | Розсіл                     | 1,27                                                    | 1,26–1,275                    |
| N <sub>1</sub> st              | Мергелісті глини, аргіліти | 2,35                                                    | 2,10–2,45                     |

Моделі річних змін у розподілі значень густини (результат кількісної 2D інтерпретації) у межах геологічного розрізу рудника, майже тотожні за двома варіантами інтерпретації, представлені на рис. 2 і 3.

**Геологічна інтерпретація результатів гравіметричного моделювання і електрометричних спостережень.** За даними геогустинного моделювання зони інтенсивного розуцільнення за 2005–2006 рр. тяжіють до

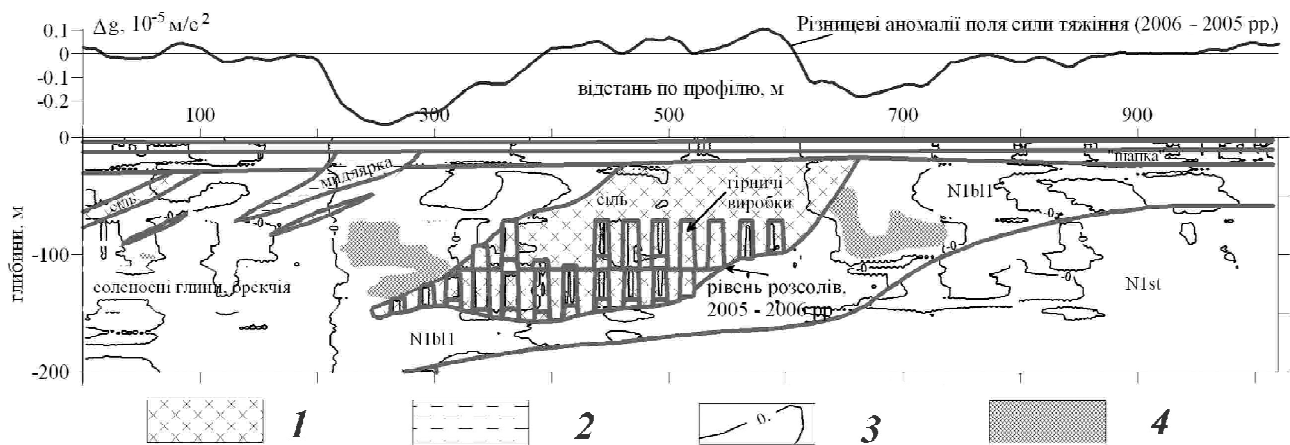


Рис. 2. Зміни у геогустинному розрізі рудника за профілем 1 у 2005-2006 рр.: 1 – поклади калійних солей, 2 – карбонатна несоленосна глина (“мідлярка”), 3 – “нульова” ізолінія, у контурі якої розвинуті зони розущільнень, 4 – інтенсивні зони розущільнення, розвинуті за рік, досягають  $-0,02-0,04$  г/см<sup>3</sup> і більше

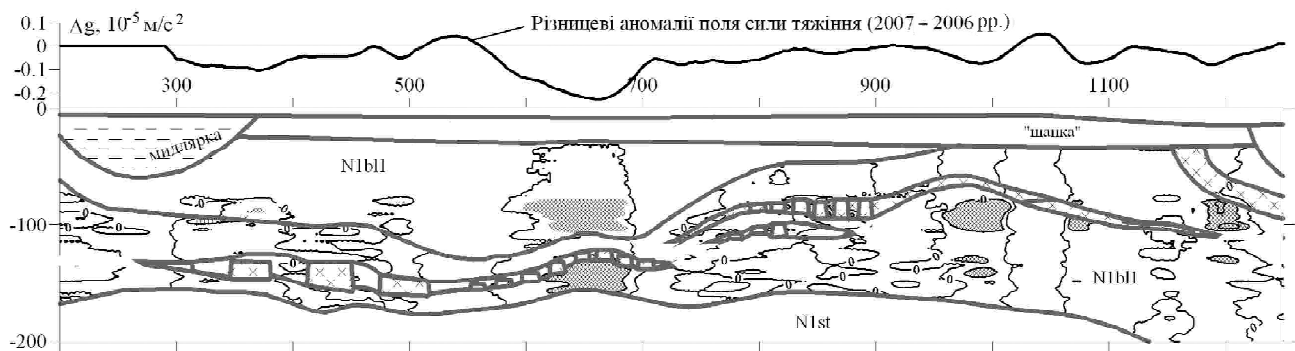


Рис. 3. Зміни у геогустинному розрізі рудника за профілем 3 у 2006–2007 рр. Умовні позначення на рис. 2

зовнішніх стінок гірничих виробок (рис. 2, 3) і сягають  $-0,06 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Проекція зон на денну поверхню має вигляд овалу, центральна частина якого не розущільнена (рис. 4, перетин профілів 1 і 2).

У 2000 р., після планового затоплення порожнин нижнього соленосного горизонту розсолами, за допомогою методу ЗСБ по профілю 1 зафіксовано аномалії електропровідності, зумовлені інтенсивною деградацією порід покрівної товщі. На думку авторів досліджень [1], у північно-східній частині профілю сформувалась насичена розсолами ослаблена зона і відбувається проникнення розсолів у соленосні брекчії. Повторні дослідження методом ЗСБ у 2005–2006 рр. зафіксували подальший розвиток цих процесів. Так, на горизонті 40 м (2005 р., рис. 4) зона аномальної електропровідності розповсюджується на значну відстань від контуру гірничих виробок. На горизонті 30 м в північно-західній частині ділянки зафіксовано розвиток зони у вигляді вузької смуги далеко за контуром виробок (2006 р., рис. 5). На глибині залягання водоупорної гіпсо-глинистої “шапки” (горизонт 20 м) аномальна зона електропровідності свідчить про проникнення вод галькового горизонту через “шапку” в соленосні відклади. Проникнен-

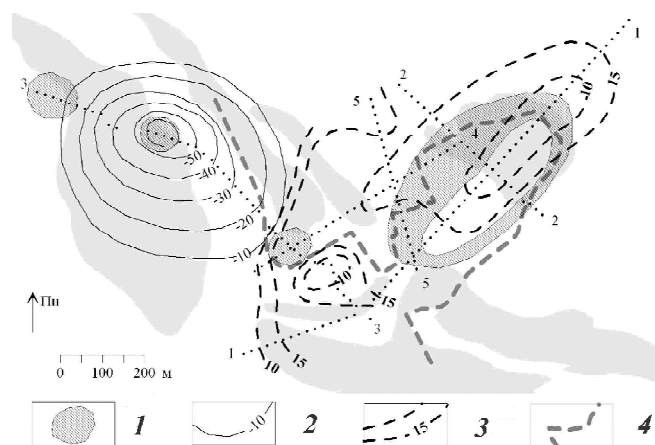


Рис. 4. Ділянка Сівка Калуська. Результати високоточної граві- і електророзвідки: 1 – проекція на денну поверхню зон розущільнення, що розвиваються у часі, 2 – ізоглибини просідання денної поверхні за 5 років у мм, 3 – ізолінії питомої електропровідності в см/м на глибині 40 м, 4 – контур підземних гірничих виробок; інші позначки на рис. 1

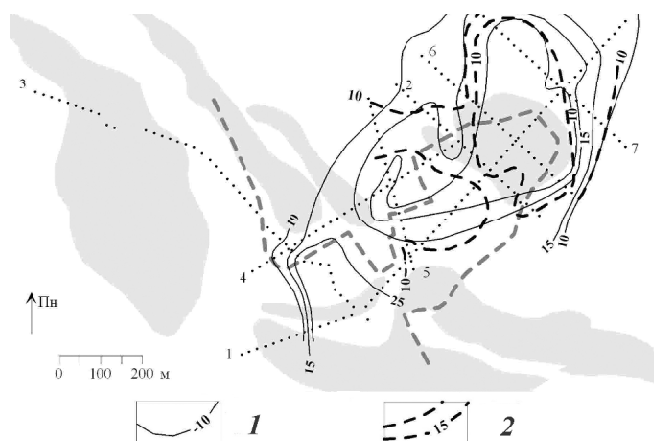


Рис. 5. Ділянка Сівка Калуська. Результати електророзвідки: 1 – ізолінії питомої електропровідності в см/м на глибині 30 м, 2 – ізолінії питомої електропровідності в см/м на глибині 20 м; інші позначки на рис. 1 і 4

ня на значні глибини утворених так розсолів може означати зародження карстоутворення з поверхні соленосної товщі (соляного дзеркала) та на зовнішніх стінках підземних виробок каїнітового пласта К-1, де за даними високоточної гравірознавдкі триває інтенсивне розущільнення (рис. 2, 4). Вочевидь ці процеси є передвісниками утворення карстових провалів на денній поверхні.

За профілем 3 (рис. 3) за даними гравіметричного моделювання виявлено декілька зон розущільнення. Зона в центральній частині профілю співпадає з епіцентром мульди просідання земної поверхні ( $-0,011$  м за рік) у межах с. Сівка Калуська. Ймовірно, що є розвиток глибинного карсту, але електрометричними роботами тут аномалії не зафіксовані: небезпечного проникнення поверхневих вод у соленосну товщу не має.

Таким чином, високоточний геофізичний моніторинг комплексом граві- і електророзвідки із застосуванням комп'ютерних технологій інтерпретації є недорогим і надійним способом прогнозу техногенного карстоутворення і динаміки змін стану геологічного середовища на відпрацьованих рудних полях як у процесі, так і після їхньої ліквідації.

1. Максимчук В.Ю., Кузнєцова В.Г., Вербицький Т.З. та ін. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. – К.: Наук. думка, 2005. – 256 с.
2. Анікєєв С.Г. Про високоточні гравіметричні спостереження і їх первинну обробку // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Ів.-Франківськ, 2003. – № 4 (9). – С. 102–107.
3. Анікєєв С.Г., Кузьменко Е.Д., Станкін О.В. Особливості гравітаційного моніторингу на прикладі рішення задач контролю експлуатації сірчаних родовищ // Там само. – Ів.-Франківськ, 1995. – 32. – С. 39–49.
4. Анікєєв С.Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при довільній будові геологічних середовищ. – Автореф. дис....канд. геол. наук: 04.00.22 / ІФДТУНГ. – Київ, 1999. – 24 с.
5. Кузьменко Э.Д., Аникеев С.Г. Информативность поля силы тяжести в задачах мониторинга месторождений серы (результаты моделирования) // Модели и алгоритмы многоуровневого управления эколого-экономическими системами региона / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины. – К., 1994. – С. 64–70.
6. Анікєєв С.Г. Комп'ютерна система рішення прямих та обернених задач гравірознавства для 2D/3D моделей складнобудованих середовищ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Серія: Розвідувальна і промислова геологія. – Ів.-Франківськ, 1997. – 34. – С. 57–63.
7. Проведення спеціальних моніторингових досліджень над шахтними полями відпрацьованих калійних рудників з метою недопущення загострення техногенно-екологічної ситуації в Калуському регіоні // Звіт по г/д №375н/05. / Під наук. керівництвом Е.Д. Кузьменка, І.М. Хмари. – НДІ “Галургія”, м. Калуш; ДІ Екологічного Моніторингу. – м. Ів.-Франківськ, 2006.