

ПРО МЕТОДИКУ ГРАВИМЕТРИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗМІН У БУДОВІ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі розглянуто методичні питання геологічної інтерпретації матеріалів гравіметричного моніторингу та результати її застосування, спираючись на досвід автора у створенні і використанні комп'ютерних технологій гравіметричного моделювання.

Ключові слова: гравіметричний моніторинг; геологічна інтерпретація; гравіметричне моделювання; комп'ютерні технології.

Вступ

Ефективний контроль за динамікою верхньої частини геологічного розрізу дозволяє вчасно передбачити просідання або обвал денної поверхні. Екологонебезпечні зміни в геологічному розрізі на глибинах від перших десятків до декількох сотень метрів зумовлені природними або техногенними факторами (недбала консервація чи ліквідація рудників калійної солі, самородної сірки, вугільних шахт, інтенсивний видобуток вуглеводнів і таке інше). Крім того економічно виправданим може бути дистанційний моніторинг ефективності видобутку корисних копалин. Наприклад, важливим є контроль за рівнем ВНК чи ГВК на родовищах вуглеводнів. Для вирішення таких завдань застосовують певні технології, що включають геодезію, буріння і комплекс геолого-геофізичних методів досліджень, у тому числі високоточну гравірозувідку, яка є одним з недорогих методів польової геофізики.

Пропонована робота є певним підсумком участі автора у розвитку методики і технологій високоточного гравіметричного моніторингу рудних полів Прикарпатського сірчаного басейну [1], Калуш-Голинського родовища калійних солей [2, 3, 4]. Гравіметричні спостереження виконувалися Івано-Франківським національним університетом нафти і газу, ЗУГРЕ (м. Львів) та ПДП “Спецгеологорозвідка” (м. Івано-Франківськ). Також враховано результати імітаційного моделювання динаміки родовищ вуглеводнів [5].

Отже, при проектуванні гравіметричного моніторингу необхідно передбачувати можливість повторних спостережень вздовж геофізичних профілів зі збереженням опорних пікетів. Гравіметричні спостереження та їхню первинну обробку бажано виконувати способами, що реалізують принцип локальної точності [6, 7], розвинутий на практиці В.Я. Біліченком у 80–90-х рр. (ЗУГРЕ). За умов обґрунтованого проектування і якісного виконання польових робіт та первинної обробки можна сподіватись на геологічну ефективність наступного кроку моніторингу, тобто комплексної інтерпретації геологічних і гравіметричних матеріалів з метою виявлення і картування у геологічному розрізі зон розвитку в часі небезпечних про-

цесів. Гравірозувідкою такі процеси ідентифікуються в зонах інтенсивного розуцільнення гірських порід (до $-0,03 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ і більше), що зумовлюють появу локальних від'ємних збурень у полі сили тяжіння та зростання їхньої інтенсивності з часом.

Обернена задача гравірозувідки

Обернена задача гравірозувідки (ОЗГ) на практиці розуміється як створення тими чи іншими шляхами густинної моделі геологічного середовища, узгодженої з аномальною складовою поля сили тяжіння, геолого-геофізичними матеріалами та з геологічними передбаченнями інтерпретатора. Геологічна змістовність і достовірність моделі якщо і залежать від способу розв'язання ОЗГ, то меншою мірою, ніж від методики моделювання і досвіду інтерпретатора. Результати розв'язання ОЗГ також залежать від якості моделі геологічного середовища і надійності виділення аномальної складової гравітаційного поля.

Формальні можливості моделі щодо опису реального (складного) середовища впливають з обраної апроксимаційної конструкції, яка складається з параметрів елементарної комірки і обмежень на загальну кількість комірок та деяких інших. Здається зрозумілим, що найкращою коміркою є маленька “цеглинка” (паралелепіпед об'ємом, наприклад, у десять – сто м^3) і коли практично немає обмежень на їхню кількість у будові моделі (рахунок йде на сотні тисяч і мільйони). Питанню оптимального вибору і технологіям реалізації апроксимаційної конструкції достатньо уваги приділено в роботах [8, 9].

Під аномальною складовою розуміють частину поля, яка зумовлена виключно областю геологічного середовища, що досліджується. Аномальна складова залежить від визначення регіонального фону та бокових зон, і це впливає на розв'язок ОЗГ, який і без того має *якісно-ймовірнісний характер*. Але негативний вплив наближеного визначення регіонального фону та бокових зон при моніторингових дослідженнях може бути зведеним до нуля (внаслідок того, що середовище завжди є одним і тим же, за винятком геодинамічно змінюваних (розуцільнюваних) зон); також стає другорядною густинна характеристика гірських порід, більш того, мож-

на замислитись і над доцільністю редукцій спостереженого поля.

Достовірність виявлення зон розвитку розушільнення (і ступеня їхньої інтенсивності) за даними гравітаційного моніторингу залежить від наступних факторів:

1) На момент проектування моніторингу є геолого-геофізичний матеріал для створення так званої апріорної моделі середовища (АМС). Припускається, що вона достатньо детально і точно описує структурну будову і густинну характеристику гірських порід розрізу до процесів руйнування. Наявність такої моделі є не тільки умовою можливості змістовного гравіметричного моделювання просторово-часових змін у розрізі, але і умовою обґрунтованого проектування (із застосуванням так званого імітаційного моделювання [10]) методики високо-точної гравіметрії.

2) Інструментом інтерпретації гравіметричних матеріалів є комп'ютерна система розв'язування двовимірних або тривимірних прямих і обернених задач гравіметрії для складно побудованих моделей геологічного середовища. У моделях, з якими здатна працювати така система, детальність опису геологічного розрізу має сягати буквально перших метрів, а обмеження на кількість і геометрію границь практично мають бути відсутніми.

3) Глибини утворення локальних зон розвитку розушільнення, їхні розміри і інтенсивність є в тих межах, за якими аномалії сили тяжіння, зумовлені дефіцитом мас, можна виявити у спостереженому полі. Для розв'язання проблеми виділення у гравітаційному полі просторово-часових слабоінтенсивних аномалій мають бути враховані обмеження на розміри площі спостережень, визначені простою умовою – площа має суттєво перевищувати очікувані планові розміри зон розушільнення.

4) У часовому інтервалі моніторингу зміни в стані геологічного розрізу, що нижче області досліджень (явно нижче зон розвитку розушільнення), і в області так званих “бокових зон” практично відсутні. За таких умов інтерпретація просторово-часових аномалій поля сили тяжіння може не потребувати попередньої процедури зняття регіонального фону та впливу бокових зон.

5) Утворення зон розвитку дефіциту мас очікується у межах певних товщ та ділянок по розрізу, що дозволяє “локалізувати” область пошуку цих зон.

6) Зміни рельєфу місцевості у часі є незначними; опорні пункти спостережень збережені. За таких умов поправкою типу Буге і іншими, крім, звісно, інструментальної, можна нехтувати. Нехтування просіданням денної поверхні, яке більше 0,01 м, призводить до помилок у визначенні інтенсивності часових аномалій по-

ля, зумовлених появою зон розушільнення, в сторону їхнього зменшення.

7) Реальне геологічне середовище, а тим більше його динаміка більш достовірно описуються тривимірними моделями. Для роботи з такими моделями необхідна площинна мережа пунктів моніторингу, що значно підвищує його вартість. Заміна площинного знімання системою профілів із подальшою двовимірною інтерпретацією все ж таки можлива з урахуванням того факту, що спотворення при двовимірному моделюванні, як правило, призводять до зменшення прогностичної інтенсивності розушільнення.

Важливим фактором є застосування геофізичного моніторингу, який включав би комплекс методів досліджень, наприклад, гравірозвідку і електромагнітне зондування у ближній зоні, інформативність якого підтверджена багаторічними дослідженнями динаміки процесів карстоутворення на стебницьких і калуських калійних рудниках [11].

Методика моделювання просторово-часових густинних неоднорідностей

Методика моделювання просторово-часових густинних неоднорідностей у геологічному розрізі за даними гравіметричного моніторингу розроблена на основі досвіду з гравіметричного моделювання будови геологічних розрізів при розв'язанні широкого кола геологічних задач [8]. Моделювання змін у геологічному розрізі може відбуватися двома способами.

У першому варіанті передбачається стандартна методика гравіметричного моделювання [12] окремо за всіма повторними спостереженнями (часовий інтервал у спостереженнях може складати місяці або роки). Зміни у будові розрізу можна виявляти шляхом порівняльного аналізу геогустинних моделей (які є результатом розв'язку ОЗГ за просторовими аномаліями поля сили тяжіння) або створення моделей суто змін у розподілі густин порід в геологічному розрізі, тобто *моделей просторово-часових геогустинних аномалій*, як різницю “у часі” між моделями. Для створення таких різницевих моделей слід дотримуватись простих правил:

1. Апріорна модель при інтерпретації аномальних полів усіх повторних спостережень є сталою.

2. Регіональний фон і будова бокових зон, визначені, наприклад, під час моделювання за першими спостереженнями, є сталими.

3. Обмеження на розв'язку ОЗГ та на кінцеву нев'язку між спостереженим полем і полем підбраної моделі мають бути теж сталими. Кінцеву нев'язку слід задавати меншою за оцінку точності спостережень (можна і у декілька разів), але таку, яку досягають усі розв'язки за низкою повторних спостережень (з досвіду моделювання).

За другим варіантом безпосередньо моделюються аномальні зміни в розподілі густин за різницею між гравіметричними спостереженнями, виконаними через певний проміжок часу, тобто моделі просторово-часових геогустинних аномалій – це результат розв’язку ОЗГ, коли кількісно інтерпретуються суто зміни аномального спостереженого поля у часі. Тут має використовуватись інше поняття апріорної моделі, що відображала б геологічні передбачення щодо можливих змін у розподілі густин у розрізі. Якщо зміни відсутні, то апріорна модель є нульовою у прямому розумінні, що в технологіях розв’язування обернених задач недопустимо. Саме тому в *апріорній “нульовій” моделі* по товщах або блоках, де ймовірні аномалії ущільнень – розущільнень, слід задавати міні-

мальну передбачувану інтенсивність змін, наприклад, від $\pm 0,0001 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ і більше, але за межами таких зон модель має залишатися нульовою, що може бути забезпечене жорсткими обмеженнями. Правила створення моделей просторово-часових густинних аномалій такі:

1. Апріорна нульова модель при інтерпретації всіх різниць між аномальними полями повторних спостережень є сталою.
2. Регіональний фон і бокові зони відсутні.
3. Обмеження на розв’язку ОЗГ та на кінцеву нев’язку між просторово-часовими аномаліями спостереженого поля і полем моделі змін у розрізі мають бути сталими.

Блок-схеми технологій моделювання за двома варіантами подані на рис. 1 і 2.



Рис. 1. Технології побудови моделей часових густинних аномалій середовища (МЧАС) (перший варіант)

Результати гравітаційного моделювання на конкретних об’єктах

Далі подано приклади інтерпретації даних гравітаційного моніторингу для розв’язання задач контролю ефективності експлуатації родовищ корисних копалин та контролю за екологічно-небезпечними посттехногенними процесами у геологічному розрізі.

1. *Гравіметричний контроль за процесом експлуатації сірчаніх родовищ* вперше був застосований на ділянках підземної виплавки сірки (ПВС) Немирівського родовища Прикарпатського сірчаного басейну. Геофізичні спостереження на площі Шаварівської ділянки до і після ПВС у 1991–1992 рр. та геологічна інтер-

претація цих даних виконані Івано-Франківським інститутом нафти і газу. *Тривимірне моделювання* динаміки виплавки сірки за різницею просторово-часовими аномаліями поля сили тяжіння було виконане за способом, близьким до другого варіанту методики побудови моделей часових густинних аномалій середовища (рис. 2). Результати моделювання представлені розрізами тривимірної моделі по лініях свердловин ПВС. Місця інтенсивної виплавки сірки у моделі відображені зонами інтенсивного розущільнення (рис. 3). Для оцінки достовірності результатів моделювання розподіл інтенсивності розущільнень було зіставлено з розподілом пористості за даними радіоактивного

каротажу [1]. Власне можливість гравіметричного моніторингу змін у будові розрізу, зумовлених техногенними факторами, була підтверджена результатами імітаційного моделювання [8].

2. Гравіметричний моніторинг розвитку карсту і руйнування соляних камер на ряді площ

рудників Калуш-Голинського родовища калійних солей у період з 2003 по 2007 рр. проведений Прикарпатським державним підприємством “Спецгеологорозвідка” з метою прогнозу загрозливого просідання земної поверхні і особливо в межах населених пунктів.



Рис. 2. Технології побудови моделей часових густинних аномалій середовища (МЧАС) (другий варіант)

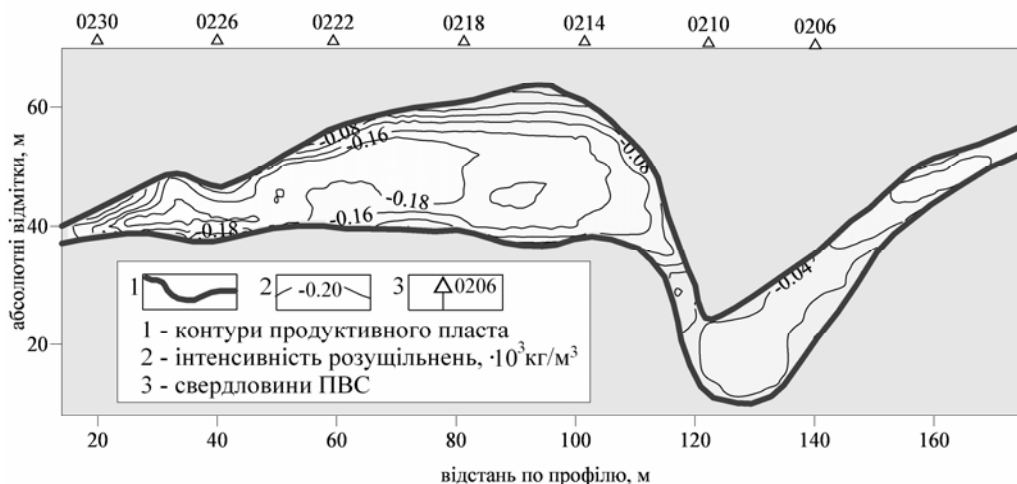


Рис. 3. Розподіл інтенсивності розуцільнення у розрізі родовища, зумовленого виплавою сірки (за матеріалами ПДП “Спецгеологорозвідка”, 1995 р.)

Інтерпретація даних профільного гравіметричного моніторингу виконувалась як за першим, так і за другим варіантами наведеної вище методики (рис. 1 і 2). Місця розвитку техногенного карсту і руйнування міжкамерних стінок та суцільності гірських порід у двовимірних моделях відображені зонами інтенсивного розуцільнення. Наприклад, на північно-каїнітовому полі рудника “Калуш” по одному з гравімет-

ричних профілів зони інтенсивних розуцільнень відзначені в інтервалах 250–300 м та 380–420 м. У першому інтервалі профілю ймовірні процеси руйнування міжкамерних ціликів та надсолевих порід, у другому – приповерхневе карстоутворення (рис. 4).

3. Гравіметричний контроль за рівнем ГВК (ВНК) на родовищах вуглеводнів є можливим, що підтверджено результатами імітаційного мо-

делювання (сама методика імітаційного моделювання описана в роботі [10]) змін у геометрії ореолу вторгнення пластових вод у продуктивну частину покладу при розробці газових родовищ [5]. Інтерпретація даних гравіметричного моніторингу з метою виявлення змін у геометрії елементів геологічного розрізу (тобто розв'язання структурної задачі) може виконуватись тільки за першим варіантом (рис. 1). Також, на

відміну від попередніх геологічних задач, тут область досліджень є суттєво більшою. При імітаційному моделюванні на газоконденсатному родовищі довжина профілю складала 15000 м, глибини досліджень – 4000–4600 м. На рис. 5 представлена модель змін рівня ГВК, яка отримана з умовою використання даних з свердловин щодо обмежень на можливі зміни рівня ГВК.



Рис. 4. Розподіл розущільнення у розрізі північного каїнітового поля рудника “Калуш”, зумовленого процесами руйнування (фрагмент) (за матеріалами ПДП “Спецгеологорозвідка”, 2008 р.)

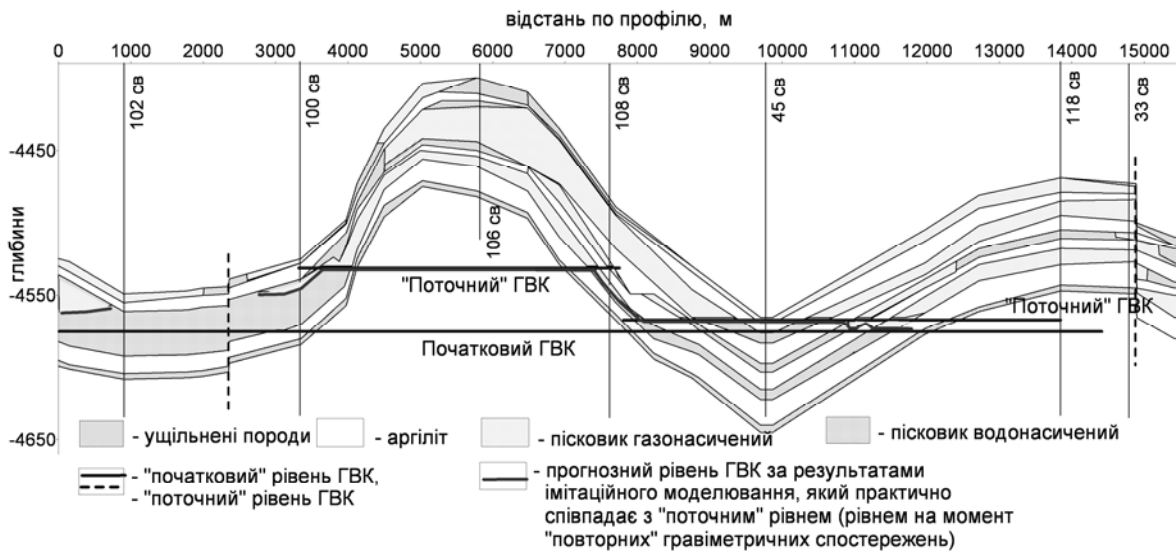


Рис. 5. Виявлення “поточного” рівня ГВК по продуктивному горизонту ГКР ДДЗ за даними імітаційного гравітаційного моніторингу (за матеріалами УкрНДІГаз, 1998 р.)

Висновки

Наведені конкретні приклади застосування описаної у статті методики моделювання просторово-часових густинних неоднорідностей у геологічному розрізі ілюструють основні осо-

бливості її застосування і демонструють хорошу ефективність та результативність при застосуванні для моніторингу спричинених різними факторами процесів розущільнення порід у діапазоні глибин від десятків метрів до кількох

км. на різних гірничопромислових об'єктах.

Література

1. Анікеєв С.Г., Кузьменко Е.Д., Станкін О.В. Особливості гравітаційного моніторингу на прикладі вирішення задач контролю експлуатації сірчаних родовищ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 1995. – Вип. 32. – С. 39–49.
2. Кузьменко Е.Д., Анікеєв С.Г., Штогрин М.В., Вовк Р.Я. Тривимірне картування карстових утворень на родовищах калійної солі за даними гравірозувідки // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Розвідувальна і промислова геологія. – Івано-Франківськ. – 1996. – Вип. 33. – С. 101–108.
3. Кузьменко Е.Д., Анікеєв С.Г., Штогрин М.В. Особливості інтерпретації гравіметричних даних методом деталізації при картуванні карстових утворень // Геологія і геохімія горючих копалин. – 1996. – № 3-4. – С. 178–183.
4. Анікеєв С.Г., Шуровський О.Д. Геофізичний моніторинг стану геологічного середовища в процесі ліквідації калійного рудника "Нова Голинь" // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2009. – С. 202–208.
5. Анікеєв С.Г., Кузьменко Е.Д. Моделювання аномалій сили тяжіння на Березівському ГКР ДДЗ // Нафта і газ України. Збірник наукових праць (матеріали 6-ої Міжнародної Конференції "Нафта-Газ України-2000", Івано-Франківськ, 31 жовтня-3 листопада 2000р.). У 2-х томах. – УНГА. – 2000. – Том 1. – С. 299.
6. Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. – М.: Недра, 1979. – 192 с.
7. Анікеєв С.Г. Про високоточні гравіметричні спостереження і їх первинну обробку // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 2003. – № 4 (9). – С. 102–107.
8. Анікеєв С.Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при довільній будові геологічних середовищ. Автореф. дис... канд. геол. наук: 04.00.22 / ІФДТУНГ – Київ, 1999. – 24 с.
9. Анікеєв С.Г. Комп'ютерна система рішення прямих та обернених задач гравірозувідки для 2D/3D моделей складнопобудованих середовищ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Розвідувальна і промислова геологія. – Івано-Франківськ. – 1997. – Вип. 34. – С. 57–63.
10. Анікеєв С.Г. Про імітаційне моделювання в гравірозувідці // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2007. – С. 292–298.
11. Максимчук В.Ю., Кузнецова В.Г., Вербицький Т.З. та ін. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. – Київ: Наук. думка, 2005. – 256 с.
12. Анікеєв С.Г. Про методику моделювання складнопобудованих середовищ у гравірозувідці // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2008. – С. 67–72.

О МЕТОДИКЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ В СТРОЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

С.Г. Аникеев

В работе рассмотрены методические вопросы геологической интерпретации материалов гравиметрического мониторинга и результаты ее применения, основываясь на опыте автора в создании и использовании компьютерных технологий гравиметрического моделирования.

Ключевые слова: гравиметрический мониторинг; геологическая интерпретация; гравиметрическое моделирование; компьютерные технологии.

ABOUT THE METHODOLOGY OF GRAVIMETRIC MONITORING OF CHANGES IN STRUCTURE OF GEOLOGICAL MEDIUM

S.G. Anikeev

In the paper the methodical questions of gravity's monitoring data geological interpretation and results of its applications are considered which was based on the author's experience in the creating and using of computer technologies of gravity modeling.

Key words: gravity's monitoring; geological interpretation; gravity modeling; computer technologies.