

МОДЕЛЮВАННЯ ГУСТИННОЇ БУДОВИ РОДОВИЩ САМОРОДНОЇ СІРКИ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ДОРОЗВІДКИ

Досвід багаторічної (1990–2005 рр.) практики гравіметричних досліджень на сірчаних родовищах втілено у методику комп'ютерної інтерпретації гравіметричних даних, актуальним геологічним завданням якої є виявлення зон підвищеного вмісту самородної сірки в рудоносному пласті або оконтурення локальних інтенсивних змін у розрізі родовищ після видобутку сірки методом підземної виплавки. Методика інтерпретації просторово-часових аномалій поля сили тяжіння, які спричинені локальними змінами в будові геологічних середовищ малих об'ємів, передбачає застосування відповідних комп'ютерних технологій швидкого і достатньо точного розв'язання прямих і обернених 2D і 3D задач гравірозвідки великої розмірності. Комп'ютерне імітаційне моделювання та практичні результати підтверджують високу геологічну та економічну ефективність детального високоточного гравіметричного моніторингу посттехногенних змін у густинній будові родовищ самородної сірки.

Ключові слова: родовище самородної сірки; метод підземної виплавки сірки; високоточна гравірозвідка; просторово-часові аномалії поля сили тяжіння; обернена 3D задача гравірозвідки; гравітаційне моделювання; тривимірна густинна модель родовища сірки.

Вступ

Гравіметричний метод є одним з важливих методів досліджень для пошуків родовищ різних корисних копалин, зокрема, сірки, та моніторингу їх розробки. Такі дослідження також виконано на Язівському і Немирівському родовищах Прикарпатського сірконосного басейну, де самородну сірку видобували відкритим способом та методом підземної виплавки (ПВС).

Інтенсивність підземної виплавки навіть з використанням густої мережі свердловин на родовищах сірки не є рівномірною [Костровская, Озерко, 1971, Резниченко, Бевза, 1973]. Вихід сірки із свердловин може становити від 10–20 % балансових запасів до 200 % і навіть до 400 %, що зумовлено перерозподілом сірки у рудному пласті. Тому під час реексплуатації родовищ методом ПВС, актуальними є задачі уточнення змін контуру покладів та оцінка залишкових запасів самородної сірки. Успішність видобутку сірки методом ПВС залежить і від уточнення поділу покладу за різним ступенем ущільненості руд [Рижик та ін., 2003].

Геофізичною експедицією Прикарпатського державного підприємства „Спецгеологорозвідка” у співавторстві з Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу та Карпатським відділенням інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України на основі багаторічних досліджень розроблено методику оцінки залишкових запасів та контролю за виплавою сірки під час експлуатації сірчаних родовищ Прикарпаття без додаткового буріння розвідувальних свердловин. Методика передбачає застосування високоточної гравірозвідки у комплексі з зондуванням становленням електромагнітного поля в ближній зоні (ЗСБ).

Мета роботи

Метою роботи є доведення геологічної і економічної ефективності високоточної гравірозвідки у комплексі з геолого-геофізичними методами досліджень змін у густинній будові геологічного розрізу родовищ самородної сірки (глибини – пер-

ші сотні метрів) під час експлуатації їх методом ПВС. Гравітаційне моделювання густинної будови геологічних середовищ ґрунтується на комп'ютерних технологіях розв'язання прямих і обернених задач гравірозвідки (ОЗГ). Результати моделювання (моделі контурів зон підвищеного вмісту або інтенсивної виплавки самородної сірки) дають змогу оцінити стан родовища і допомагають виконати підрахунок або перерахунок запасів сірки.

Тестовим моделюванням (В. Біліченко, 1995 р.) показано, що для типового розрізу сірчаних родовищ Прикарпатського басейну підземна виплавка сірки (зміна об'ємної густини) може спричинити аномалії сили тяжіння інтенсивністю до $(-0.025 \div -0.05) \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$ при виплавці сірки на локальних ділянках і до $(-0.08 \div -0.1) \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$ – при виплавці з усього пласта. Такі ж результати отримано низкою модельних експериментів [Кузьменко, Анікеєв, 1994]. На практиці детальну площинну високоточну гравірозвідку і комп'ютерне 3D моделювання, що спрямовані на вивчення розподілу густин і пористості в межах продуктивної товщі, уперше застосовано на Немирівському родовищі сірки [Кузьменко, Анікеєв, 1988].

Імітаційне моделювання зон інтенсивної виплавки сірки

Геологічну ефективність певного методу інтерпретації геофізичних матеріалів потрібно оцінювати на тестових прикладах, що максимально наближені до реальних умов вирішення конкретних геологічних завдань [Страхов, 1998]. Методика такого імітаційного моделювання спрямована не тільки на випробовування комп'ютерних інтерпретаційних технологій, а також дає змогу досліджувати особливості інтерпретаційного процесу в конкретних умовах, зокрема, в задачах моніторингу динаміки змін у будові верхньої частини геологічного розрізу [Анікеєв, 2007].

Імітаційну модель “реальної” густинної будови розрізу Грушівської дільниці Немирівського родовища сірки показано на рис. 1, а. Зону виплавки

сірки виділено контуром інтенсивного розуцільнення. Товща, що залягає вище та нижче від продуктивного горизонту, практично однорідна. Припустимо, що високоточну гравітаційну зйомку проведено після ПВС, тобто у якості “спостереженого поля” приймаємо теоретично розраховане поле імітаційної моделі. Дані про характер виплавки сірки “відсутні” і тому продуктивний горизонт у апріорній моделі, яка побудована за даними буріння до виплавки сірки, повинен бути однорідним (рис. 1, б). Імітаційне геологічне завдання полягає у виявленні та оконтуренні зон інтенсивної виплавки сірки. Передбачається (гіпотеза), що під час виплавки сірки істотні зміни у розрізі, крім як у межах продуктивного горизонту, відсутні. Тому пошук розв’язку ОЗГ обмежено контуром продуктивної товщі, а густини інших товщ у моделі геологічного розрізу закріплено.

Моделювання-1 виконано за припущення, що внаслідок ПВС можлива поява зон як розуцільнення, так і ущільнення осіркovanого вапняку. Обмеження на ймовірні варіації густини вапняку прийняті від $2.25 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ до $2.60 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Модель, яка є результатом комп’ютерного моделювання (розв’язок ОЗГ) і формально є ϵ -еквівалентною моделлю, оскільки розв’язок ОЗГ не однозначний (символ ϵ підкреслює, що його отримано з певною точністю), показано на рис. 2, а. Найінтенсивніша зона розуцільнення, яку обмежено ізоденсою $2.35 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (у межах 100–300 м по профілю), практично збігається з імітаційною зоною інтенсивної виплавки сірки. Крім простеження наслідків ПВС відзначається незначна псевдоаномалія (до $+0.02 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$) в інтервалі 420–500 м профілю.

Моделювання-2 відрізняється геологічною гіпотезою, за якою наслідком ПВС у межах товщі осіркovanого вапняку є тільки зони розуцільнення. Обмеження на ймовірні варіації густини прийняті від $2.10 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ до $2.42 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. У результаті розв’язання ОЗГ в еквівалентній моделі (рис. 2, б) виділена зона розуцільнення, яка за формою та інтенсивністю дуже близька до імітаційної (“реальної”).

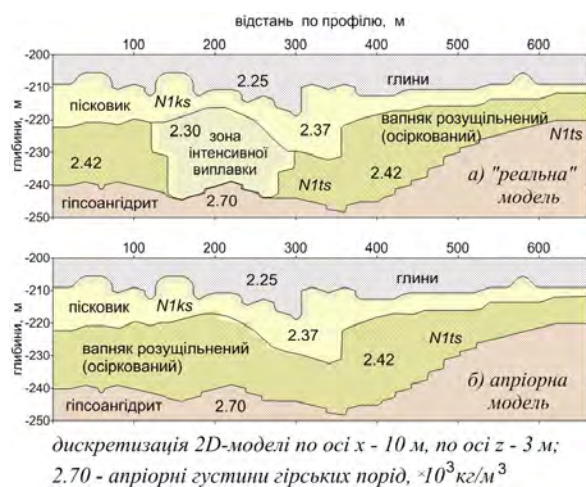


Рис. 1. Імітаційна “реальна” (а) та імітаційна апріорна (б) моделі розрізу родовища

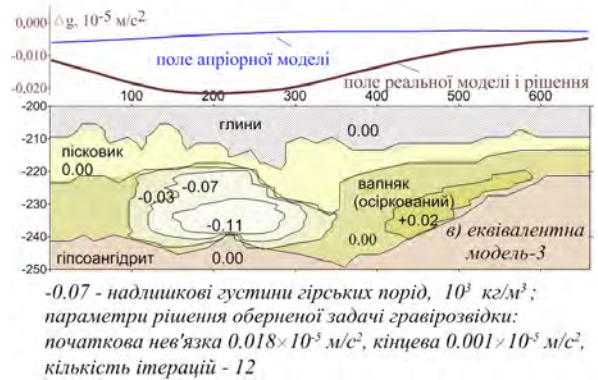
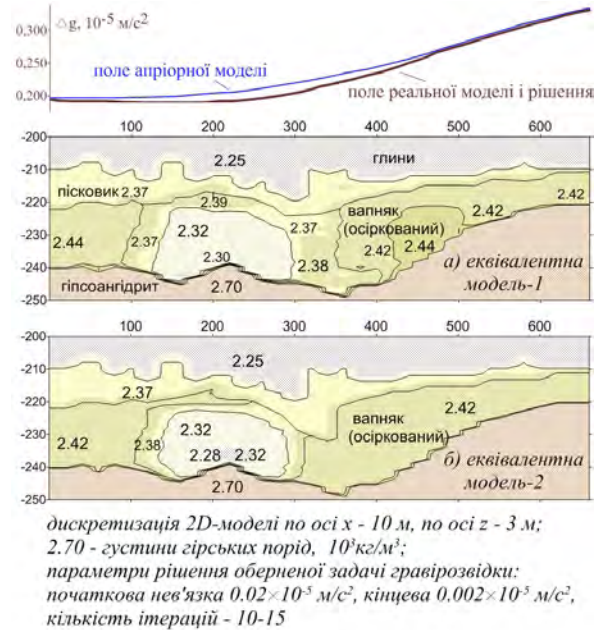


Рис. 2. Еквівалентні моделі розрізу родовища

Можливість вивчення динаміки змін у густинній будові розрізу за розподілом просторово-часових аномалій поля сили тяжіння заслуговує особливої уваги, оскільки у цьому випадку істотно звужується область пошуку розв’язку ОЗГ і, отже, підвищується достовірність гравітаційного моделювання.

Моделювання-3 виконано за припущення, що гравіметричне знімання проведено до і після ПВС. Імітаційне моделювання динаміки розрізу засновано на двох імітаційних “реальних” моделях. Перша – модель розрізу до ПВС (рис. 1б), друга – після ПВС (рис. 1а). У якості “спостереженого” поля використано просторово-часові варіації поля сили тяжіння, які є різницею між: полем, спостереженим після ПВС, мінус полем спостереженим до ПВС. Під час інтерпретації просторово-часових варіацій, зумовлених змінами у продуктивному пласті під впливом ПВС, неточністю даних про густину проміжного шару (густину Буге) можна знехтувати і враховувати тільки висоти пунктів спостережень (незмінність розташування пунктів повторних спостережень не гарантовано); також можна знехтувати проблемою наближеного визначення впливу бокових зон, регіонального фону та будови розрізу над і під продуктивним пластом.

Передбачення щодо впливу ПВС на стан продуктивного пласта формалізовані у вигляді апріорної моделі просторово-часових змін в розподілі густин. Перерозподіл мас передбачається тільки в межах продуктивної товщі, тому тільки для неї задано апріорне значення надлишкової густини не нульове, але з дуже малою варіацією в $+0.001 \cdot 10^3$ кг/м³. Надлишкова густина інших частин розрізу (надлишкова у сенсі зміни її значення внаслідок ПВС), зокрема і бокових зон прийнята нульовою. Обмеження на можливі просторово-часові варіації надлишкової густини за змістом подібні обмеженням при попередніх моделюваннях. Результат розв'язання ОЗГ (еквівалентна модель-3) наведено на рис. 2, в. Усі імітаційні еквівалентні моделі 1–3 (рис. 2) містять практично однакові за розмірами, контуром та інтенсивністю локальні зони розуцільнення, що відповідають “реальній” зоні виплавки сірки. Недоліком першої і третьої моделей є невелика за розмірами та інтенсивністю псевдоаномалія, якої немає в імітаційній “реальній” моделі (рис. 1, а).

Моделювання-4 виконано за припущеннями, що в контурі продуктивної товщі під час підземної виплавки сірки відбуваються процеси перевідкладення порід, тобто можлива поява зон як розуцільнення, так і ущільнення порід. Імітаційну “реальну” модель, де наслідки ПВС відображено у вигляді зон розуцільнення та ущільнення, наведено на рис. 3, а. Геологічна гіпотеза подібна до попередньої, тому апріорна модель і обмеження на варіації густин ті самі.

Еквівалентна модель-4 (рис. 3, б), яку також побудовано за різницеvim імітаційним полем, містить густинні аномалії, які за контуром, розмірами та інтенсивністю практично ідентичні імітаційним “реальним” зонам ущільнення і розуцільнення.

Також можна запропонувати спосіб імітаційного моделювання або інтерпретації на практиці спостережених просторово-часових варіацій поля сили тяжіння, який дає змогу працювати не тільки з густинними, але й зі структурними моделями динаміки геологічних середовищ. На початку за геолого-геофізичними матеріалами формується апріорна

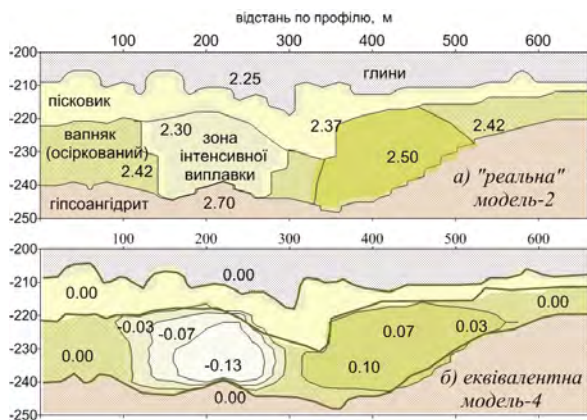


Рис. 3. Імітаційна “реальна” та еквівалентна моделі розрізу родовища

структурна модель. Розраховується “штучне” сумарне поле: теоретичне поле апріорної моделі плюс просторово-часові варіації, які визначені за результатами польових спостережень до і після ПВС. Це сумарне поле приймається за “спостережене” поле. Наступне комп’ютерне моделювання (імітаційне або на практичних матеріалах) змін у часі геометрії густинних границь (тут густина характеристика незмінна) і побудова просторово-часових еквівалентних структурних моделей проводиться за стандартними процедурами [Анікеєв, 1999].

Наведені результати імітаційного моделювання підтверджують можливість достовірного картування зон інтенсивної виплавки сірки за допомогою комп’ютерної інтерпретації гравіметричних даних.

Спостережене поле сили тяжіння і якісна інтерпретація

Гравіметричний контроль за виправкою сірки передбачає детальне високоточне знімання поля сили тяжіння до і після ПВС (або хоча б після ПВС). Знімання поля повинно бути не менше ніж трикратним і виконуватись за методикою, що відповідає принципу локальної точності [Маловичко, 1979], та зі строгим дотриманням вимог високоточного гравітаційного моніторингу.

Для прикладу на рис. 4 показано схему спостереженого поля сили тяжіння після ПВС на Старозівській дільниці Язівського родовища самородної сірки. Локальні аномалії (рис. 5) можна виділити зі спостереженого поля трансформацією осереднення. Радіус вікна осереднення повинен приблизно відповідати глибинам залягання продуктивного пласта. Прогнозовано, що більшість свердловин з високим видобутком самородної сірки розташовані в межах від’ємних локальних аномалій.

Зрозуміло, що у трансформованому полі разом з техногенними аномаліями (наслідками видобутку сірки) наявний і ефект природних джерел, які розташовані в геологічному розрізі до глибин залягання продуктивного пласта включно.

Для виявлення техногенної складової у полі, спостереженому після ПВС, В. Біліченко (Львів, Західноукраїнська геофізична розвідувальна експедиція, 1995 р) запропонував *геологічне редукування*. Цей спосіб розділення полів полягає у послідовному вилученні зі спостереженого поля теоретично розрахованих аномалій сили тяжіння від достатньо детальних густинних моделей частин розрізу родовища, будова яких відома за даними буріння, та одержання залишкових аномалій, які ймовірно зумовлені лише ПВС. Геологічне редукування спостереженого поля проведено на південно-західній і східній ділянках Шаварівської дільниці Немирівського родовища у два етапи. На першому етапі визначено регіональні гравітаційні ефекти, зумовлені впливом структурної будови родовища і масами, що залягають нижче від продуктивного пласта. За другим – змодельовано локальні аномалії, зумовлені неоднорідностями в рудному пласті, густину яких визначено залежно від вмісту сірки (по свердловинах до ПВС).

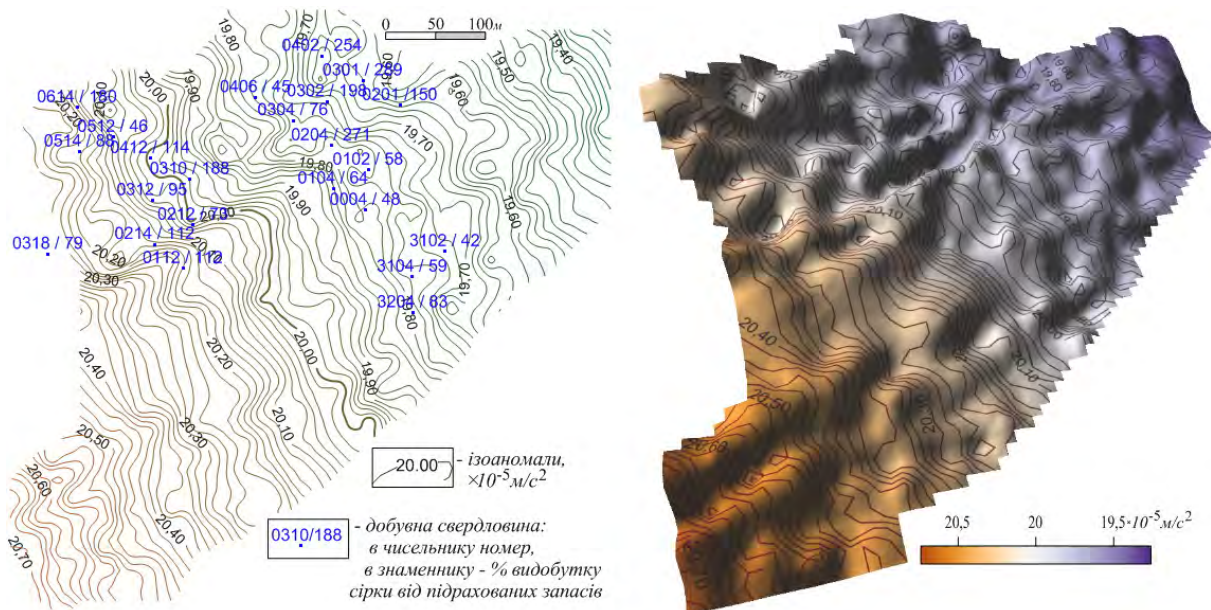


Рис. 4. Старозавівська ділянка Головного покладу Язівського родовища самородної сірки. Аномалії сили тяжіння в редукції Буге (зліва – в ізоаномалах, справа – у 3D-зображенні)

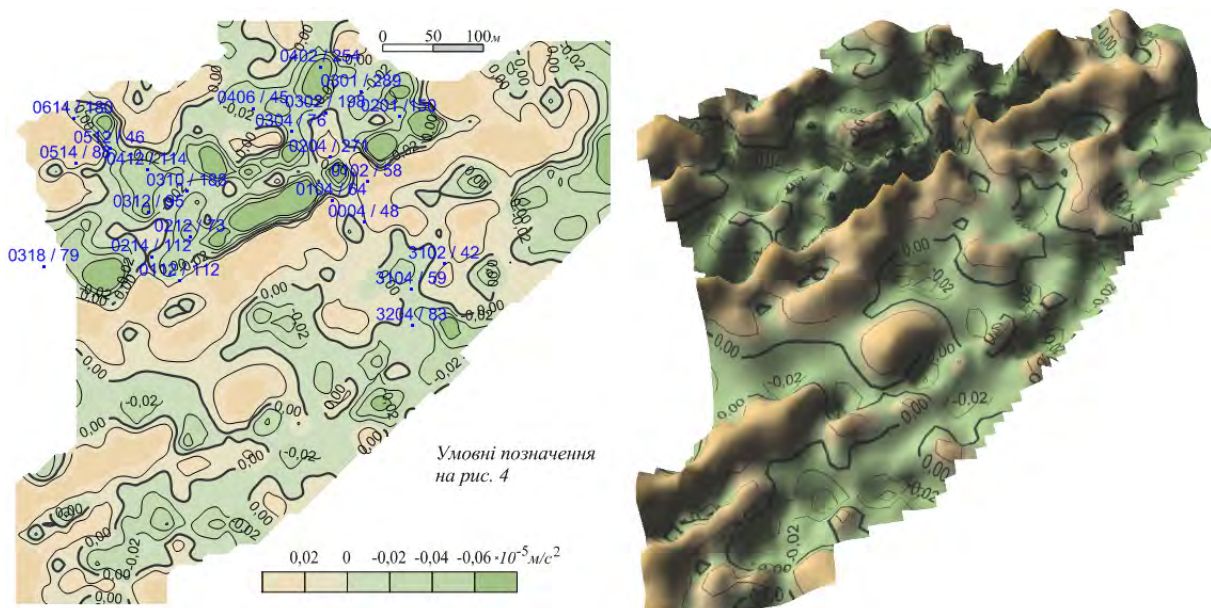


Рис. 5. Старозавівська ділянка Головного покладу Язівського родовища самородної сірки. Локальні аномалії поля сили тяжіння (орієнтовна глибина простеження – 80–120 м) (зліва – в ізоаномалах, справа – у 3D-зображенні)

Детальність таких густинних моделей забезпечено значним обсягом буріння на Шаварівській ділянці, де мережа свердловин становить $20 \times 20 \text{ м}^2$. Точність підбору спостережених локальних аномалій теоретично розрахованими аномаліями В. Біліченко контролював найвірогіднішою різницею між спостереженим і теоретичним полем, яка за тестовою оцінкою інтенсивності впливу процесу виплавки може бути в інтервалі від $-0.08 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$ до $+0.02 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$. На схемі залишкового поля контури від'ємних аномалій (за варіантом В. Біліченка: $\leq -0.05 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$) відповідали зонам інтенсивної виплавки сірки.

Виконання фонового (до ПВС) гравітаційного знімання істотно підвищує достовірність виявлення і картування зон виплавки сірки, оскільки просте визначення різниці між полями, спостереженими до і після ПВС, надає просторо-часові аномалії переважно техногенного походження. Крім того, високоточний гравіметричний моніторинг на ділянках родовищ, які вже виведені з експлуатації, можна використати і для досліджень посттехногенних процесів, зокрема прогнозу розвитку карстових процесів.

Порівняно з якісною інтерпретацією тривимірне гравітаційне моделювання дає змогу детальніше досліджувати та оконтурювати зони роз-

ущільнення в плані і в розрізі родовища. Методику такої кількісної інтерпретації просторово-часових аномалій поля сили тяжіння, яку засновано на комп'ютерних технологіях уточнення і деталізації довільних за складністю і розмірами густинних моделей геологічних середовищ [Анікеєв, 1999], апробовано на імітаційному моделюванні.

Моделювання зон інтенсивної виплавки сірки за матеріалами гравіметричних знімів до і після ПВС

Гравіметричний моніторинг застосований на західній площі Шаварівської дільниці Немирівського родовища. У результаті інтерпретації просторово-часових аномалій поля сили тяжіння (різниця між полем, спостереженим після ПВС, і фоновим полем, спостереженим до ПВС) отримано тривимірну модель змін у розподілі густин, які зумовлено ПВС суто у межах рудного пласта [Анікеєв та ін., 1995]. Результати моделювання подано розрізами моделі по лініях свердловин ПВС. Місця інтенсивної виплавки сірки у моделі відображено зонами інтенсивного розуцільнення (рис. 6).



Рис. 6. Шаварівська дільниця Немирівського родовища сірки. Розріз тривимірної моделі зон розуцільнення у межах контурів продуктивного пласта після виплавки сірки

У моделі найбільші розуцільнення тяжіють до припіднятої частини пласта, а у заглиблених частинах пласта вони меншої інтенсивності, або відсутні, що може бути зумовлено погіршенням умов виплавки або стіканням розплавленої сірки у ці частини пласта [Кузьменко та ін., 1988].

Моделювання зон інтенсивної виплавки сірки за матеріалами гравіметричних знімів після ПВС

Більшість дільниць ПВС відроблені без попередніх фонових гравітаційних знімів. Проблему оконтурення зон виплавки сірки, коли є гравіметричні спостереження тільки після ПВС, може бути вирішено за аналізом розподілу залишкових аномалій, які визначаються, як зазначено вище, шляхом геологічного редукування.

Запропоновано спосіб, який заснований на гравітаційному моделюванні (розв'язку 3D ОЗГ). Він позбавлений складних і деколи довготривалих

процедур геологічного редукування, але вимагає не менш ретельного і максимального врахування геологічних даних по розрізу, зокрема даних по свердловинах щодо геометрії товщ і густини порід, для детального відтворення густинної будови геологічного середовища, що вміщує рудний пласт, в апріорній моделі (моделі до ПВС). Результатом інтерпретації поля сили тяжіння, спостереженого після ПВС, буде уточнена модель розподілу густин, де зони розуцільнення, що відсутні у апріорній моделі рудного пласта, вірогідно відображатимуть інтенсивність виплавки сірки.

Нижче наведено приклади інтерпретації аномального поля сили тяжіння на Староязівській і північно-західній дільниці Головного покладу Язівського родовища. Моделювання виконано за основними кроками методики інтерпретації геолого-гравіметричних матеріалів: аналіз геологічної ситуації і спостереженого поля сили тяжіння, створення апріорних моделей, виконання гравітаційного моделювання (розв'язання оберненої задачі) та геологічний аналіз результатів моделювання.

Староязівська дільниця Головного покладу Язівського родовища самородної сірки

Спостережене поле сили тяжіння. Схему спостереженого поля сили тяжіння після ПВС на Староязівській дільниці Язівського родовища самородної сірки показано на рис. 4. Розмір площі – 600×600 м²; сітка спостережень – 10×10 м²; точність знімів ≤0,02×10⁻⁵ м/с². Локальні аномалії (рис. 5) виділено зі спостереженого поля за допомогою осереднення з радіусом вікна у 100 м, який відповідає глибинам залягання продуктивного пласта (≈80÷120 м). Більшість свердловин з високим видобутком самородної сірки розташовані у межах від'ємних локальних аномалій, які або зумовлені інтенсивним видобутком сірки (техногенні аномалії), або є ефектами природних джерел.

Апріорна густинна модель. Відповідно до геологічного завдання щодо виявлення і оконтурення зон інтенсивної підземної виплавки сірки апріорна модель середовища детально відображає будову ділянки родовища самородної сірки до початку її експлуатації.

Апріорну тривимірну модель родовища, один з розрізів якої наведено на рис. 7, складено у межах інтервалу глибин залягання продуктивної товщі (70–120 м). Глибини визначено відносно умовної площини приведення (мінімальної альтитуди, що у межах площі).

Геометрію геологічних границь родовища (геометрію покрівлі та підшови кондиційної руди та ін.) відтворено за даними буріння та матеріалами геофізичних досліджень свердловин; густину літологічних комплексів для моделі – за даними лабораторних досліджень керну з урахуванням досвіду з геолого-гравітаційного моделювання сірчанних родовищ у межах Передкарпатського басейну у попередні роки [Анікеєв, Кузьменко, 1988, 1994, 1995].

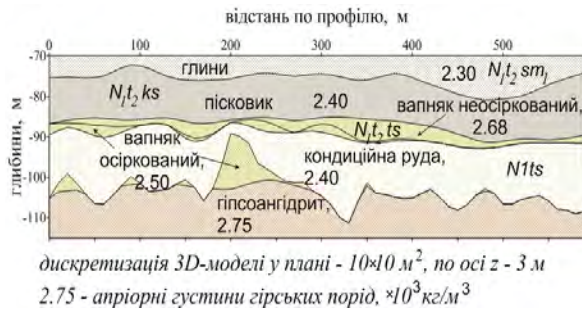


Рис. 7. Розріз апіорної тривимірної моделі Староязівської дільниці Головного покладу Язівського родовища сірки (профіль широтного напрямку)

Достовірність гравітаційного моделювання залежить від ступеня адекватності геологічним завданням методики інтерпретації, від точності та деталізації апіорних модельних побудов, від апроксимаційної конструкції (способу дискретизації області геологічного середовища), від якості врахування впливу бокових зон, регіонального фону тощо.

Також відомо, що довільне за складністю геологічне середовище може бути детально описане великою кількістю маленьких комірок, втім практична цінність такої апроксимації залежить від комп'ютерних технологій, які б забезпечували точне і швидке розв'язання прямих і обернених задач гравірозвідки на моделях дуже великої розмірності. У якості апроксимаційної конструкції густинних моделей передбачено щільну упаковку маленьких комірок: прямокутних паралелепіпедів розмірами $10 \times 10 \times 1 \text{ м}^3$ (3D модель) або прямокутних призм розмірами $10 \times 1 \text{ м}^2$ (у випадку 2D моделей). Розміри комірок у плані (по профілю) визначено масштабом гравіметричних знімів.

Загальна кількість комірок для апроксимації 3D густинної моделі Староязівської дільниці родовища сірки становила $60 \times 60 \times 50$ комірок.

Бокові зони, що прилягають до апіорної моделі, апроксимовані горизонтальним продовженням густинних границь, що виходять на грані моделі, на нескінченність. До того ж для точнішого врахування впливу бокових зон передбачено побудову моделей ближніх бокових зон [Анікеєв, 1999].

Регіональний фон (складова спостереженого поля, яка зумовлена будовою частини геологічного розрізу, що нижче від області досліджень) наближено описано складовою, яка має вигляд нахиленої площини, що, на думку О. Маловічка [Маловічко, 1966], є найбільш оптимальним варіантом апроксимації фону з геологічних міркувань.

Для зменшення впливу верхньої частини розрізу, що вище від області досліджень, та похибок спостережень виконано згладжування поля за способом О. Маловічка [Маловічко, 1992], який для цього і призначений.

Задля дотримання високої достовірності розв'язку ОЗГ візуалізацію результатів моделювання (а

також апіорної моделі і карти спостереженого поля сили тяжіння) виконано тільки в межах контуру ділянки, що покрита густою мережею свердловин.

Результати комп'ютерної інтерпретації геолого-гравіметричних матеріалів. Обернену 3D задачу гравірозвідки розв'язано з використанням комп'ютерної системи "Complex.Gravity" [Анікеєв, 1997], технологія якої реалізовано основи математичних методів критеріального підходу (О. Кобрунов) до лінійних і лінеаризованих структурних обернених задач гравірозвідки. Технології удосконалені фізично детермінованим способом визначення параметра регуляризації [Анікеєв, 1993] та збільшення кількості ітерацій (спосіб великих ітерацій) для підвищення геологічної змістовності розв'язку і деталізації густинної будови в невеликих об'ємах геологічних середовищ.

Формальні параметри моделювання: початкова середньоквадратична нев'язка – $0.05 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$, кінцева – $0.02 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$, кількість ітерацій – 150, тривалість розв'язання (ПК з частотою процесора в 1 ГГц) – 30 хв при загальному об'ємі невідомих (значень густин) – $60 \times 60 \times 50$.

Геогустинну модель Староязівської дільниці Язівського родовища, яка є результатом розв'язання 3D оберненої задачі гравірозвідки, може бути подано розподілом густин у форматах *.grd по довільній поверхні у межах моделі. У цьому випадку розподіл густин кондиційної руди надано по горизонтальних зрізах через *один метр* в інтервалі глибин 91–100 м (рис. 8, 9), по покрівлі (рис. 10, а) і підшві продуктивного пласта (рис. 10, б). Зони дефіциту мас (розущільнення) оконтурені ізоденсою $2.4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Тривимірна геогустинна модель зіставлена з даними видобутку сірки.

Зони дефіциту мас по покрівлі кондиційної руди (рис. 10, а) займають більшу частину дільниці і переважно оточують експлуатаційні свердловини з високим видобутком сірки (більше 40 % від підрахованих запасів). З глибиною контури дефіциту мас змінюються і на глибинах 93–97 м (рис. 8) розпадаються на частини, але північна зона загалом зберігається. В інтервалі глибин 98–102 м (рис. 9) виявлено зону дефіциту мас північно-східного простягання. Вона простежується до підшви кондиційної товщі (рис. 10, б) і відділена від північної зони широкою смугою ущільнених порід. Ущільнена зона відображає наявну на цих глибинах товщу гіпсоангідритів. Розподіл густини по підшві кондиційної руди (рис. 10, б) в загальних рисах зберігає форму, характерну для нижньої частини горизонту, що представлено на зрізах на глибинах 98–100 м (рис. 9).

Тут доречно зазначити, що достовірну загальну яву про ймовірний розподіл мас можуть надавати і трансформанти поля сили тяжіння, що видно з порівняння розподілу локальних аномалій поля сили тяжіння (рис. 5) зі зрізами і планами тривимірної густинної моделі (рис. 8–10).

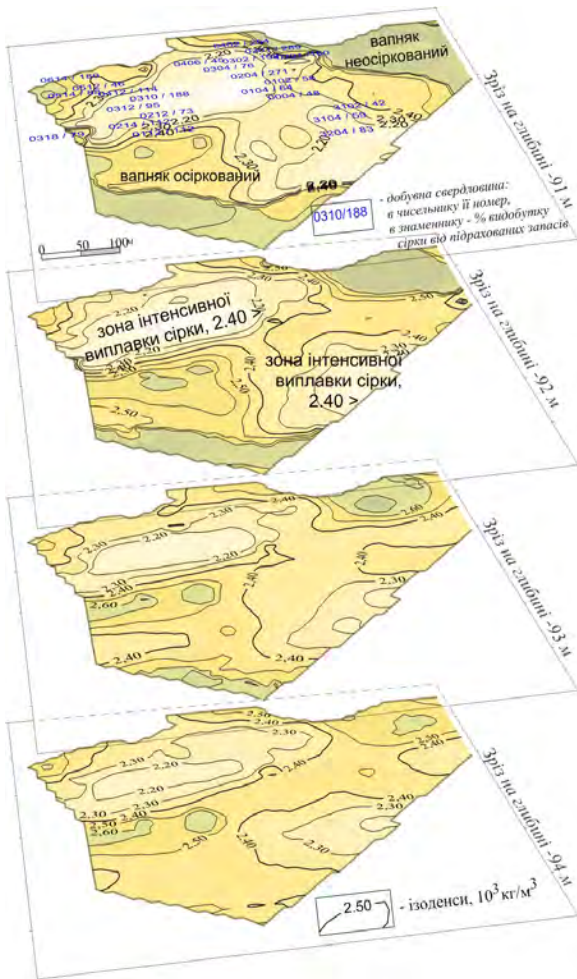


Рис. 8. Головний поклад Язівського родовища сірки. Староязівська дільниця ПВС. Тривимірна густинна модель покладу сірки (інтервал глибин 91–94 м)

Одержані результати моделювання у комплексі з іншими геолого-геофізичними матеріалами використані для оконтурення технологічних типів руд і побудови прогнозної карти розподілу запасів за ступенем їх вилучення.

**Північно-західна частина
Головного покладу Язівського родовища**

Геофізичну розвідку північно-західної частини Головного покладу Язівського родовища самородної сірки виконано під час підготовки її до експлуатації підприємством виплавкою. Площинні гравіметричні дослідження у комплексі з ЗСБ забезпечили врахування природних геологічних факторів, а отже, зменшення буріння розвідувальних свердловин для планування ПВС.

Локальні аномалії поля сили тяжіння. Розмір площі досліджень – $1000 \times 1000 \text{ м}^2$; сітка гравіметричних спостережень – $20 \times 20 \text{ м}^2$; точність знімів $\leq 0,02 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$. Локальні аномалії сили тяжіння на північно-західній дільниці Головного покладу Язівського родовища самородної сірки (рис. 11) виділено зі спостереженого поля за допомогою

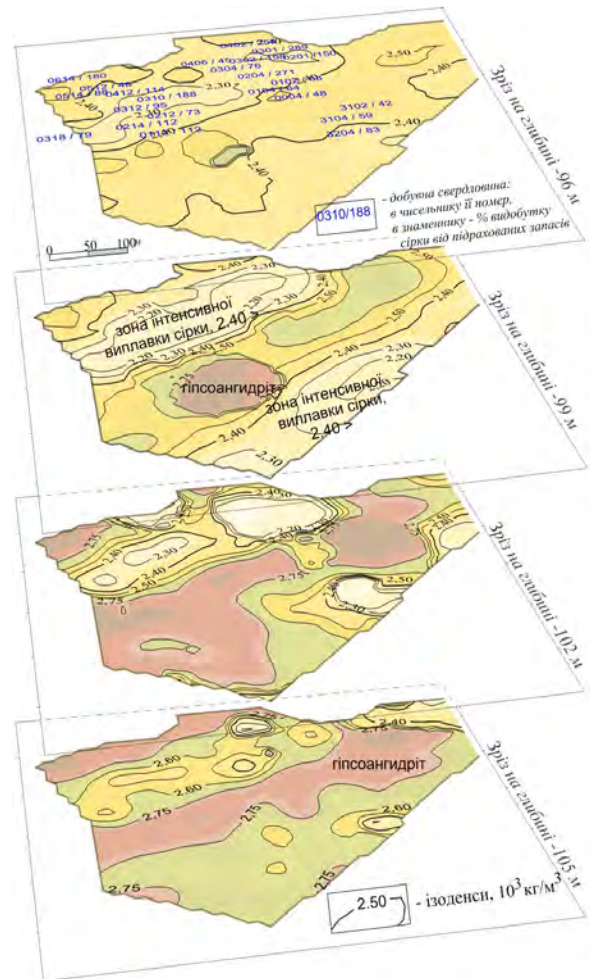


Рис. 9. Головний поклад Язівського родовища сірки. Староязівська дільниця ПВС. Тривимірна густинна модель покладу сірки (інтервал глибин 96–105 м)

трансформації з радіусом вікна осереднення у 150 м, що відповідає глибинам залягання продуктивного пласта ($\approx 145\text{--}165 \text{ м}$), отже вони є ефектами природних джерел, розташованих до вказаних глибин.

Апріорну тривимірну густинну модель ділянки родовища самородної сірки, як і у попередньому випадку, складено у межах інтервалу глибин залягання продуктивної товщі (60–115 м), визначеного відносно умовної площини приведення (мінімальної альтитуди у межах площі). Геометрію геоустинних границь родовища (покривлі гіпсоангідриту, осіркованого і неосіркованого вапняку, руди, знову вапняку і пісковика) відтворено за даними розвідувального буріння і ЗСБ; густинну характеристику літологічних комплексів визначено аналогічно до попереднього випадку.

Загальна кількість комірок апроксимаційної конструкції для опису 3D густинної моделі дільниці родовища становила $58 \times 54 \times 55$; розміри комірок – $20 \times 20 \times 1 \text{ м}^3$, що визначено масштабом гравіметричних знімів і необхідною детальністю досліджень за глибиною.

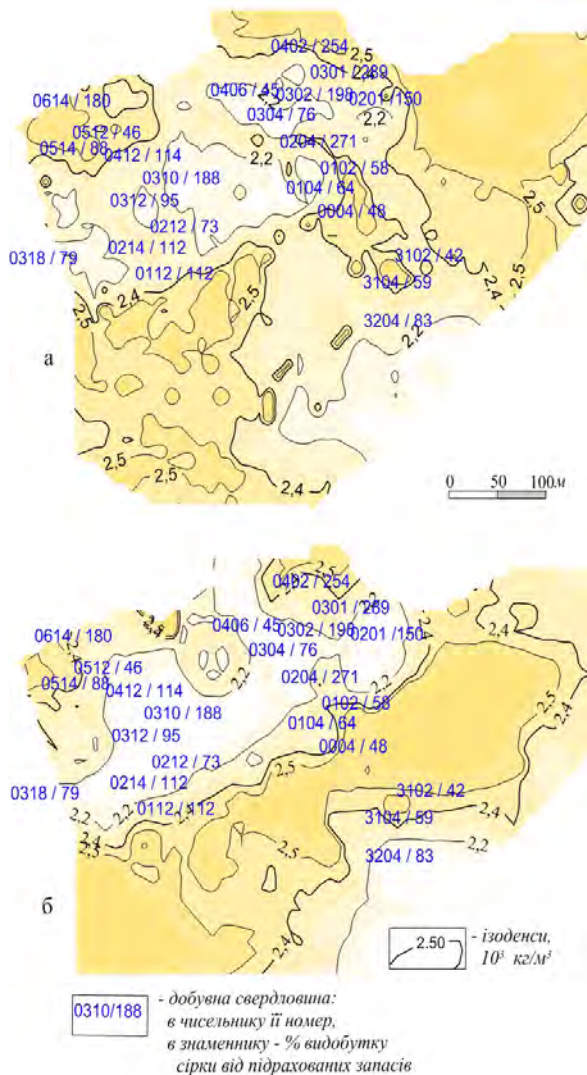


Рис. 10. Головний поклад Язівського родовища сірки. Старозавізька дільниця ПВС. План розподілу густини у межах товщі кондиційної руди: а – по покрівлі; б – по підшві

Результати комп'ютерної інтерпретації. Формальні параметри розв'язку оберненої задачі гравірозвідки (3D моделювання): початкова нев'язка -0.08×10^{-5} м/с², кінцева -0.04×10^{-5} м/с², кількість ітерацій – 140.

Актуальні результати гравітаційного моделювання північно-західної дільниці Головного покладу Язівського родовища представлено у межах товщі кондиційної руди за варіантами: розподілом густин по покрівлі (рис. 12, а) і по підшві (рис. 12, б). Зони дефіциту мас (розущільнення) оконтурені ізодеңсою $2.50 \cdot 10^3$ кг/м³.

Загалом відзначається певна кореляція між мікрорельєфом покрівлі (підшви) осіркованого вапняку і морфологією зон розущільнення (зон високого вмісту сірки) під покрівлею (над підшоною). Розподіли густин у межах осіркованих вапняків і в

неосіркованих вапняках істотно відрізняються. Якщо у межах останніх зони розущільнення простежуються у вигляді окремих плям, то в межах рудного пласта розущільнення охоплюють близько половини усієї ділянки досліджень. Найбільше за площею розущільнення простягається через всю дільницю по лінії свердловин з 16г на півночі до 2124гр і 2125гр на півдні; друга за розмірами зона розущільнення має напрямок, близький до субширотного і розташована між свердловинами 2124гр і 2108гр. Обидві зони у плані тяжіють до лінійних зон пониження мікрорельєфу поверхні осіркованих вапняків.

На схемі розподілу густин по підшві осіркованих вапняків виділяється субмеридіальна зона розущільнення, яка в плані тяжіє до лінійних заглиблень залягання вапняків [Рижик та ін., 2003].

Одержана тривимірна модель розподілу густини у товщі рудного пласта на ділянці, де розвідувальне буріння проведено по рідкій сітці, сприяє прогнозуванню підрахунку видобувних запасів сірки.

Висновки

З результатів імітаційного моделювання контурів підземної виплавки сірки випливає, що високоточний гравітаційний моніторинг та гравітаційне моделювання можуть забезпечити геологічний контроль за процесом підземної виплавки сірки, а також за посттехногенним станом сірчанних родовищ. Також імітаційне моделювання показало, що аномальні зони у рудоносній товщі, інтенсивність яких менша за $\pm 0.02 \times 10^3$ кг/м³, можуть бути малоімовірними.

Зіставлення моделі розподілу густини з даними видобутку сірки методом ПВС на Старозавізькій дільниці Язівського родовища самородної сірки свідчить про високу вірогідність тривимірного густинного моделювання родовища самородної сірки. Складна диференціація густин у межах сірконосною товщі, що виявлена за результатами гравітаційного моделювання, підтверджується незалежними даними про істотно нерівномірний видобуток сірки методом ПВС.

Також очевидно, що трансформації спостереженого поля сили тяжіння можуть бути використані для отримання достовірної експрес-інформації про характер видобутку сірки.

Отже, високоточне гравітаційне знімання і, особливо, гравіметричний моніторинг ділянок ПВС на родовищах Прикарпатського сірчаного басейну із застосуванням комп'ютерних технологій є ефективним і недорогим засобом у комплексі геолого-геофізичних методів контролю за процесом підземної виплавки сірки, а у загальнішому сенсі підтверджено доцільність використання гравіметрії для контролю за техногенними, посттехногенними і природними процесами, що відбуваються у розрізі родовищ корисних копалин та над родовищами, що експлуатуються.

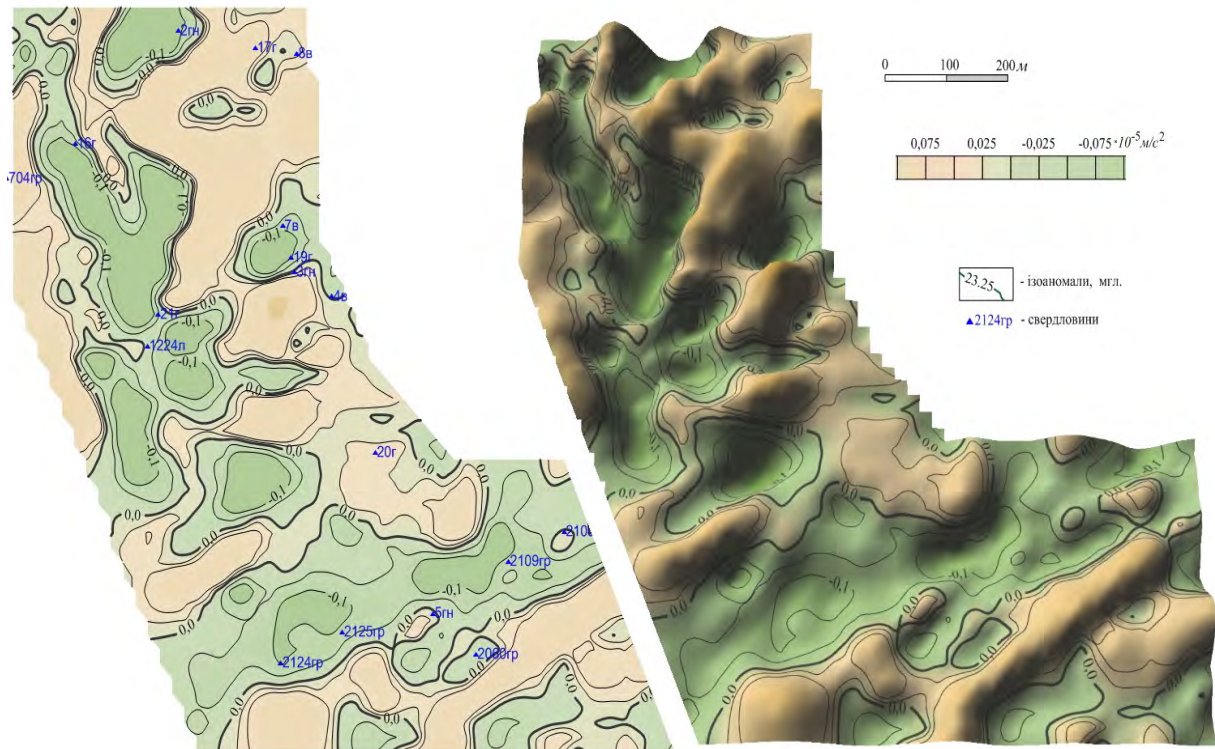


Рис. 11. Північно-західна частина Головного покладу Язівського родовища самородної сірки. Локальні аномалії поля сили тяжіння (радіус осереднення 100 м, орієнтовна глибина простеження 0–120 м) (зліва – в ізоаномалах, справа – в 3D зображенні)

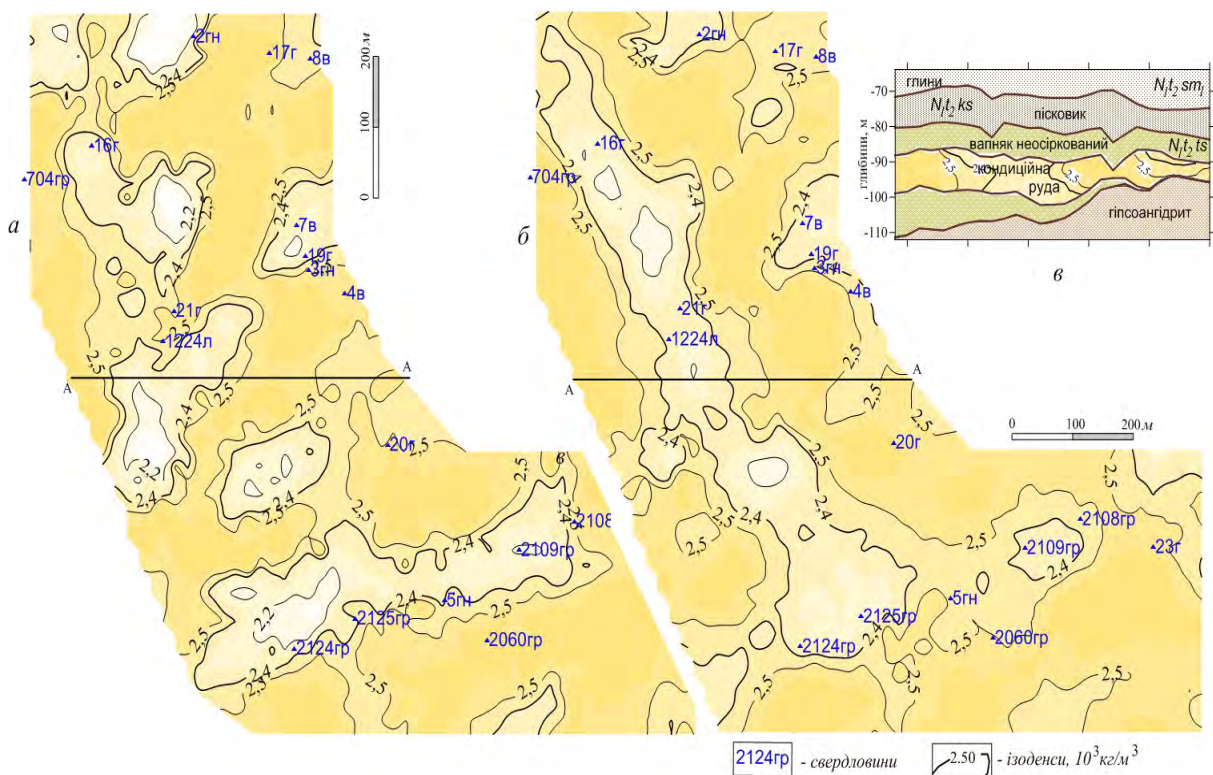


Рис. 12. Головний поклад Язівського родовища сірки. Північно-західна ділянка. План розподілу густини у межах тривимірної моделі товщі кондиційної руди: а – по поверхні; б – по підшві, в – розріз моделі родовища по лінії А-А

Література

- Анікеєв С.Г. Про фізичну детермінованість квазірозв'язків лінійних обернених задач гравімагнітометрії // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Львів: Вища школа. – 1993. – Вип. 30. – С. 9–17.
- Анікеєв С.Г., Кузьменко Е.Д., Станкін О.В. Особливості гравітаційного моніторингу на прикладі вирішення задач контролю експлуатації сірчанних родовищ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 1995. – Вип. 32. – С. 39–49.
- Анікеєв С.Г. Комп'ютерна система рішення прямих та обернених задач гравірозвідки 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.
- Анікеєв С.Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при довільній будові геологічних середовищ: Автореф. дис... канд. геол. наук. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 1999. – 24 с.
- Анікеєв С.Г. Про імітаційне моделювання в гравірозвідці // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2007. – С. 292–298.
- Анікеєв С.Г. Про методику моделювання складнопобудованих середовищ в гравірозвідці // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2008. – С. 67–72.
- Анікеєв С.Г. Про методику гравіметричного моніторингу змін в будові геологічного середовища // Геодинаміка. – 2008. – № 1(7). – С. 141–146.
- Анікеєв С.Г., Степанюк В.П. Гравірозвідка і магніторозвідка: навч. посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 242 с.
- Костровская А.И., Озерко Н.Г. Пористость и кавернозность серных руд в связи с извлечением серы // Галогенные формации Украины и связанные с ними полезные ископаемые. – К.: Наук. думка. – 1971. – С. 207–209.
- Кузьменко Э.Д. и др. Состояние и перспективы геофизической изученности серных месторождений при подготовке их к подземной выплавке. Обзор. Инф. Сер. Сера и серная промышленность, – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – 59 с.
- Кузьменко Е.Д., Анікеєв С.Г., Меньшиков В.В. Плотностная характеристика разреза по результатам детальных гравиразведочных работ на Немировском месторождении серы // Проблемы производства серы: Сб. науч. тр.: ДСП/ВНИПИСера – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – С. 104–108.
- Кузьменко Э.Д., Анікеєв 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. – Киев. – 1994. – С. 64–70.
- Маловичко А.К., Основной курс гравиразведки. Ч. 1. – Пермь, 1966. – 326 с.
- Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. – М., Недра, 1979. – 192 с.
- Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка. – М.: Недра, 1992. – 357 с.
- Резниченко Л.Б., Бевза Ю.В. Об использовании общегеологических особенностей сероносных толщ для удешевления строительства рудников подземной выплавки серы // Тектоника и полезные ископаемые запада Украинской ССР. Часть II. – К.: Наук. думка. – 1973. – С. 134–135.
- Страхов В.Н. Современное состояние и перспективы развития теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Труды международной конференции. – Воронеж. – 1998. – С. 4–35.
- Рижик Є.І., Шуровський О.Д., Мачкур О.В. Звіт про геологорозвідувальні роботи “Розвідка північно-західної частини Головного покладу Язівського родовища самородної сірки з метою підготовки її до експлуатації підземною виплавою”. Геолого-геофізична експедиція ПДП “Спецгеологорозвідка”, Міністерство промислової політики України. – Івано-Франківськ, 2003. – 305 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТНОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ ПО МАТЕРИАЛАМ ГРАВИТАЦИОННОЙ ДОРАЗВЕДКИ

С.Г. Анікеєв

Опыт многолетней (1990–2005 гг.) практики гравиметрических исследований на месторождениях самородной серы лег в основу методики компьютерной интерпретации гравиметрических материалов, актуальным геологическим заданием которой является выявление зон повышенного содержания серы в рудоносном пласте или оконтуривание локальных интенсивных изменений в разрезе месторождений после добычи серы методом подземной выплавки. Методика интерпретации пространственно-временных аномалий поля силы тяжести, обусловленных локальными изменениями в строении геологических сред небольших объемов, предполагает использование соответствующих компьютерных технологий быстрого и достаточно точного решения прямых и обратных 2D и 3D задач гравиразведки большой размерности. Компьютерное имитационное моделирование и практические результаты подтверждают высокую геологическую и экономическую эффективность детального высокоточного гравиметрического мониторинга посттехногенных изменений в плотностном строении месторождений самородной серы.

Ключевые слова: месторождение самородной серы; метод подземной выплавки серы; высокоточная гравиразведка; пространственно-временные аномалии поля силы тяжести; обратная 3D задача гравиразведки; гравитационное моделирование; трехмерная плотностная модель месторождения серы.

**MODELING OF DENSITY STRUCTURE OF NATIVE SULFUR CONTENT DEPOSITS
BY ADDITIONAL GRAVITATIONAL EXPLORATION DATA**

S.G. Anikeyev

The experience of many years (1990-2005) of practice gravity survey in the fields of native sulphur formed the basis of the methods of computer interpretation of gravity materials. Relevant geological task of the methods is to identify areas of high sulphur content in the ore-bearing formation or delineation of local intensive changes in the context of the post-mining deposits of sulphur by underground melting. The space-time gravity anomalies are caused by local changes in the structure of small amounts of geological environments. Methods of interpretation of such anomalies suggests the use of appropriate computer technology for fast and enough accurate solutions of 2D and 3D gravity direct problems and inversions of large dimension. Computer simulation and practical results confirm the high geological and economical efficiency of detailed precision gravimetric monitoring of posttechnogenic changes in the density structure of native sulphur deposits.

Key words: deposits of native sulphur; method of underground sulphur melting; precision gravity exploration; space-time anomalies of the gravity field; 3D gravity inversion; gravity modelling; three-dimensional density model of sulphur deposits.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ*

Надійшла 10.06.2013