

***БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА***

*БР. НЗ – 82.00.00.000 ПЗ*

*Група НЗФ - 21 - 1*

*Лідія Турянська*

***2025***

Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Міністерства освіти і науки України

Факультет природничих наук

Кафедра нафтогазової геофізики

Турянська Лідія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

УДК 550.830

(індекс)

## **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

Розрахунок аномальних гравітаційних ефектів від шахтних гірничих виробок на основі рішення прямих задач гравірознавства для елементарних тіл

(назва роботи)

Геологія нафти і газу, геофізика, геоінформатика, інженерна геологія та гідрогеологія  
(назва освітньої програми)

103 “Науки про Землю”

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Л.О. Турянська

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Габльовський Богдан Богданович к. геол. н... доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

зав. кафедри І. О. Федак

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет природничих наук  
Кафедра нафтогазової геофізики  
Освітній рівень перший (бакалаврський)  
Спеціальність 103 – Науки про Землю  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Федак І. О.

«    »                      20   року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Турянській Лідії Олександрівній  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок аномальних гравітаційних ефектів від шахтних гірничих виробок на основі рішення прямих задач гравірозувідки для елементарних тіл

керівник роботи Габльовський Богдан Богданович к геол. н., доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом закладу вищої освіти від "3" квітня 2025 року № 245:7

2. Строк подання студентом роботи 9 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи спеціалізована література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; 1. Прямі задачі гравірозувідки: теоретичні основи, методи та підходи; 1.1 Аналіз існуючих методик розрахунку гравітаційних ефектів від підземних структур; 1.2 Геометричні моделі елементарних тіл, що використовуються для моделювання шахтних виробок; 1.3 Вплив шахтних виробок на аномалії гравітаційного поля; 2. Розрахунок аномальних гравітаційних ефектів; 2.1 Коротка геологічна характеристика району досліджень; 2.2 Вибір геометричних та параметричних моделей шахтних виробок; 2.3 Чисельні методи та програмні комплекси для моделювання гравітаційних аномалій; Висновок; Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентаційна графіка

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 05.04.2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Одержання завдання і складання плану роботи	05.04.-10.04.2025	
2	Загальні відомості та геологічна будова району	11.04-25.04.2025	
2	Обґрунтування та розрахунки параметрів для проведення моделювання	26.04.-25.05.2025	
	Оформлення тексту і презентаційної графіки	26.05-09.06.2025	
3	Підготовка до захисту бакалаврської роботи	10.06-16.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_ Турянська Л. О.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Габльовський Б. Б.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Обсяг бакалаврської роботи 53 сторінок. Бакалаврська робота складається з двох частин (загальної і розрахункової) та містить 22 рисунки, 13 таблиць та 17 джерел літератури.

В першому розділі «Прямі задачі гравірозвідки: теоретичні основи, методи та підходи» розглянуто аналіз існуючих методик розрахунку гравітаційних ефектів від підземних структур, геометричні моделі елементарних тіл, що використовуються для моделювання шахтних виробок та вплив шахтних виробок на аномалії гравітаційного поля.

В другому розділі розглянуто такі питання: коротка геологічна характеристика району досліджень, вибір геометричних та параметричних моделей шахтних виробок, чисельні методи та програмні комплекси для моделювання гравітаційних аномалій та результати моделювання.

Розрахунок гравітаційного ефекту від створених геологічних схем, здійснено шляхом рішення прямих задач гравірозвідки з використанням комп'ютерної системи Mathcad.

Ключові слова: гравірозвідка, елементарні тіла, шахти, аномалії, пласт, вертикальний циліндр, моделювання.

## ABSTRACT

The bachelor's thesis comprises 53 pages and consists of two main sections (theoretical and computational), including 22 figures, 13 tables, and 17 literature sources.

The first section is dedicated to direct gravity exploration problems: theoretical foundations, methods, and approaches. It presents an analysis of existing techniques for calculating gravitational effects caused by subsurface structures, as well as the geometric models of elementary bodies used for simulating mine workings and their influence on gravitational field anomalies.

The second section focuses on the following aspects: a brief geological overview of the study area, selection of geometric and parametric models of mine workings, numerical methods and software tools for simulating gravitational anomalies, and a summary of the modelling results.

The gravitational effect of the constructed geological models was calculated by solving direct gravity exploration problems using the Mathcad computational system.

**Keywords:** gravity exploration, elementary bodies, mines, anomalies, layer, vertical cylinder, modelling.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>1 ПРЯМІ ЗАДАЧІ ГРАВІРОЗВІДКИ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Аналіз існуючих методик розрахунку гравітаційних ефектів від підземних структур.....	11
1.2 Геометричні моделі елементарних тіл, що використовуються для моделювання шахтних виробок.....	12
1.3 Вплив шахтних виробок на аномалії гравітаційного поля.....	16
<b>2 РОЗРАХУНОК АНОМАЛЬНИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ.....</b>	<b>19</b>
2.1 Коротка геологічна характеристика району досліджень.....	19
2.2 Вибір геометричних та параметричних моделей шахтних виробок.....	28
2.3 Чисельні методи та програмні комплекси для моделювання гравітаційних аномалій.....	31
2.4 Результати моделювання.....	41
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>45</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>47</b>

**Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів**

ЛВБ – Львівсько–Волинський кам’яновугільний басейн

ЛБ – Львівський басейн

СЄП – Східноєвропейська платформа

СПЗ – Спеціалізоване програмне забезпечення

## ВСТУП

Дослідження в галузі вивчення підземних структур, включно з шахтними гірничими виробками, спрямовані на підвищення точності визначення гравітаційних аномалій, що виникають унаслідок техногенних порушень.

З розвитком обчислювальної техніки чисельні методи набувають усе більшого значення. Використовуються такі підходи, як метод кінцевих елементів, метод скінченних різниць і інтегральні методи. Програмні комплекси, такі як GCIS, GRAV3D, GM-SYS та інші, дозволяють моделювати гравітаційні ефекти від складних геологічних об'єктів, зокрема шахтних виробок. Проте згадані програмні комплекси, як правило є дорогими, обмежено доступними та вимагають значних затрат часу на створення апріорних моделей геологічного середовища. Для оперативного оцінювання впливу шахтних гірничих виробок на гравітаційне поле з метою подальшого їх врахування при інтерпретації гравітаційних аномалій, за певних умов, доцільно використовувати рішення прямих задач гравірозвідки для елементарних тіл.

Аномальні гравітаційні ефекти, спричинені підземними гірничими виробками, становлять важливу проблему для гравірозвідки, яка спрямована на вивчення геологічної будови земної кори та оцінку її ресурсного потенціалу. Шахтні виробки, як штучні елементи підземного середовища, створюють специфічні порушення у гравітаційному полі, що потребує точного врахування під час геофізичних досліджень. Розрахунок таких ефектів є ключовим завданням у розв'язанні прямих задач гравірозвідки та сприяє підвищенню точності геологічної інтерпретації.

У даній роботі увагу приділено розробці методики та чисельних підходів для моделювання гравітаційних аномалій, що викликаються елементарними тілами, які імітують геометрію шахтних виробок. Використання прямих задач дозволяє детально аналізувати залежність аномальних гравітаційних ефектів від параметрів гірничих виробок, таких як форма, розмір, глибина залягання та

густина заповнюючого матеріалу. Це забезпечує основу для корекції даних гравітаційного поля та більш точного моделювання геологічних структур.

Метою роботи є проведення чисельних розрахунків та опису гравітаційних ефектів від шахтних виробок для отримання кількісних характеристик гравітаційних аномалій.

Поставлені такі задачі роботи:

1. Аналіз існуючих методик розрахунку гравітаційних аномалій, викликаних підземними структурами.
2. Моделювання шахтних виробок.
3. Оцінка впливу виробок на гравітаційне поле.

Об'єкт дослідження - шахтні гірничі виробки Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну.

Предмет дослідження - аномальні гравітаційні ефекти на основі рішення прямих задач для елементарних тіл.

Результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності геофізичних методів вивчення зон гірничих робіт та зменшенню невизначеностей при прогнозуванні геологічного середовища.

## **1 ПРЯМІ ЗАДАЧІ ГРАВІРОЗВІДКИ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ**

У сучасній геофізиці гравірозвідка залишається одним із провідних методів для вивчення підземних структур, включно з шахтними гірничими виробками.

Гравірозвідка - це метод розвідувальної геофізики, що дозволяє досліджувати просторовий розподіл аномалій гравітаційних полів біля поверхні Землі з метою з'ясування їхньої геологічної природи. У свою чергу гравітаційні аномалії - це збурення полів, які зумовлені неоднорідним розподілом густини та негоризонтальністю геологічних границь в геологічному розрізі [1].

Геологічна інтерпретація гравірозвідувальних даних підрозділяється на два основних етапи: якісна інтерпретація і кількісна інтерпретація. Якісна інтерпретація гравіметричних даних полягає у вивченні гравітаційного поля, виділенні аномалій, описі, класифікації, встановленні зв'язку гравітаційного поля з геологічною будовою району. Кількісна інтерпретація полів виконується з використанням методів розв'язку так званих прямих та обернених задач і спрямована на визначення глибини залягання, форми і розмірів геологічних утворень, а деколи і розподілу густини у їхніх межах. Достовірність і точність результатів інтерпретації залежить від вибору методів, методики та ступеня використання апріорної інформації [1, 2].

Рішення прямої задачі - теоретичні обчислення аномалій поля від заданих моделей геологічних утворень. У найпростішому випадку – розрахунок аномалії від окремих елементарних тіл із заданим кроком по профілю, який розташований в площині денної поверхні.

Прямі задачі є фундаментальним інструментом для розрахунку гравітаційних ефектів, спричинених підземними структурами. У цій сфері активно досліджується вплив густини, розмірів і форми шахтних виробок на гравітаційні аномалії.

## 1.1 Аналіз існуючих методик розрахунку гравітаційних ефектів від підземних структур.

Існуючі методики розрахунку гравітаційних ефектів від підземних структур засновані на вирішенні прямих задач гравірозвідки. Вони дозволяють оцінювати вплив підземних об'єктів на гравітаційне поле Землі шляхом моделювання розподілу мас у просторі. Основними підходами до розрахунку є аналітичні, чисельні та комбіновані методи [3].

1. **Аналітичні методи.** Аналітичні методи базуються на використанні спрощених геометричних моделей (сфер, циліндрів, пластів), для яких існують точні математичні розв'язки. Вони є ефективними для початкових оцінок або вивчення ізольованих об'єктів. [1,4].
2. **Чисельні методи.** Чисельні методи використовуються для розрахунку гравітаційних ефектів у випадках складних геометрій та неоднорідного розподілу густини. Ці методи дозволяють адаптувати моделі до реальних умов, включаючи складну форму шахтних виробок [5,6].
3. **Комбіновані методи.** Комбіновані методи поєднують переваги аналітичних і чисельних підходів, що дозволяє підвищити точність розрахунків при оптимізації обчислювальних витрат. Наприклад, використання аналітичних моделей як базису для чисельного уточнення [7].

До основних недоліків існуючих методик можна віднести обмеження аналітичних методів у складних геометріях, високу обчислювальну вартість чисельних методів а також потребу у великій кількості вхідних даних, таких як густина гірських порід та їх точна геометрія.

## 1.2 Геометричні моделі елементарних тіл, що використовуються для моделювання шахтних виробок.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці геометричних моделей, які імітують форму шахтних виробок: прямокутних тунелів, вертикальних шахт, камерних систем тощо. Багато дослідників використовують спрощені моделі (сфера, циліндр, паралелепіпед), що дозволяють отримати аналітичні розв'язки прямих задач. Водночас існує тенденція до використання складніших форм, таких як багатогранники, для підвищення точності результатів.

Для моделювання шахтних виробок у гравірозвідці використовуються ідеалізовані геометричні моделі, які наближають форму підземних структур до простих математичних об'єктів. Тіла простої форми описуються невеликою кількістю параметрів, що суттєво спрощує кількісну інтерпретацію. Точність та достовірність результатів моделювання залежить від ступеня близькості геологічних утворень до тіл простої форми [1].

Кулею можуть бути наближено описані невеликі ізольовані об'єкти. Формула для обчислення гравітаційного ефекту залежить від маси, густини та відстані до об'єкта (рисунок 1.1) [1, 8]:

$$Dg(x,0,0) = f \times M \times \frac{h}{(x^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (1.1)$$

де  $f = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \times \text{с}^2)$  - гравітаційна стала;

$r = (x^2 + h^2)^{1/2}$  – радіус-вектор;

$M$  - маса кулі;

$h$  - глибина залягання центру кулі.

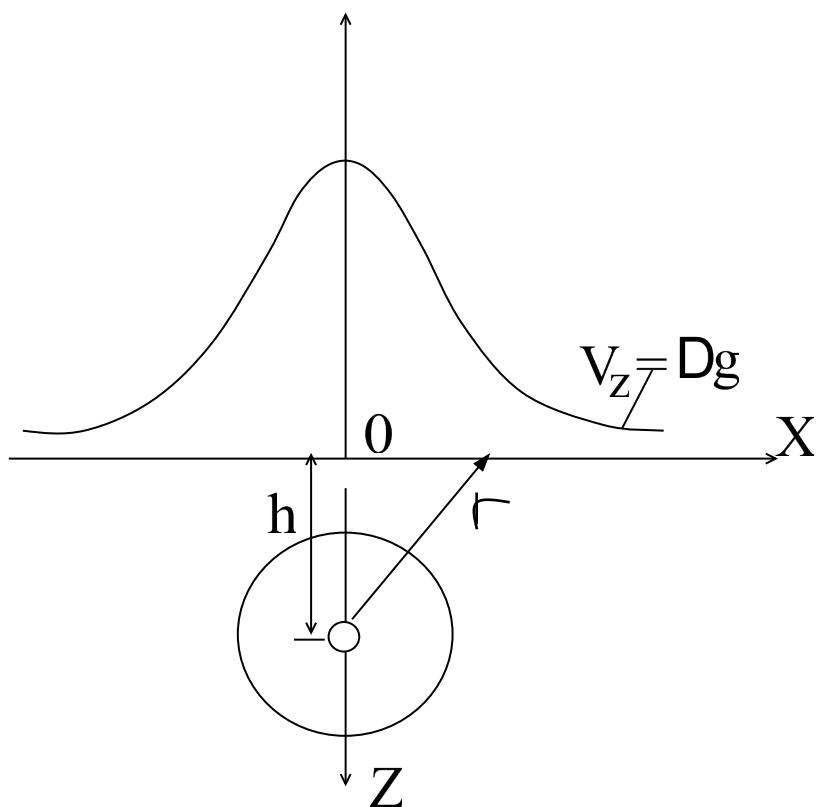


Рисунок 1.1 – Крива  $V_z$  над кулею.

Горизонтальним циліндром [1, 9] можуть бути наближено описані геологічні структури і тіла, розміри яких за простяганням значно більші, ніж вхрест простягання: довгі горизонтальні шахти.

Аномалія сили тяжіння горизонтального циліндра, довжиною  $2 \times b$  та розташованого симетрично площини  $xOz$ , наступна:

$$Dg(x,0,0) = 2 \times f \times \frac{h}{r^2} \times j_1(b); \quad (1.2)$$

$$\text{де } j_1(b) = \frac{b}{(x^2 + b^2 + h^2)^{1/2}};$$

$r = (x^2 + h^2)^{1/2}$  – радіус-вектор;

$l$  - лінійна густина.

При  $b \rightarrow \pm\infty$  функція  $j_1(b) = 1$ , а формула (2) переходить у формулу для нескінченного горизонтального циліндру.

Перетин циліндра тотожний перетину кулі (рисунок 1.1). Аномалія від горизонтального циліндру подібна до відповідної кривої від кулі, однак ширше за простяганням та більша за інтенсивністю.

*Вертикальним циліндром*, простягання якого на глибину обмежене [1, 9], наближено описуються геологічні утворення, вертикальні розміри яких значно більші за горизонтальні, а останні малі в порівнянні із глибиною їхнього залягання - довгі вертикальні шахти. Аномалія сили тяжіння вертикального циліндра (рисунок 1.2):

$$Dg(x,0,0) = f \gamma \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + h_2^2}} \right]; \quad (1.3)$$

де  $h_1$  та  $h_2$  - глибина залягання відповідно верхньої та нижньої кромки вертикального циліндра.

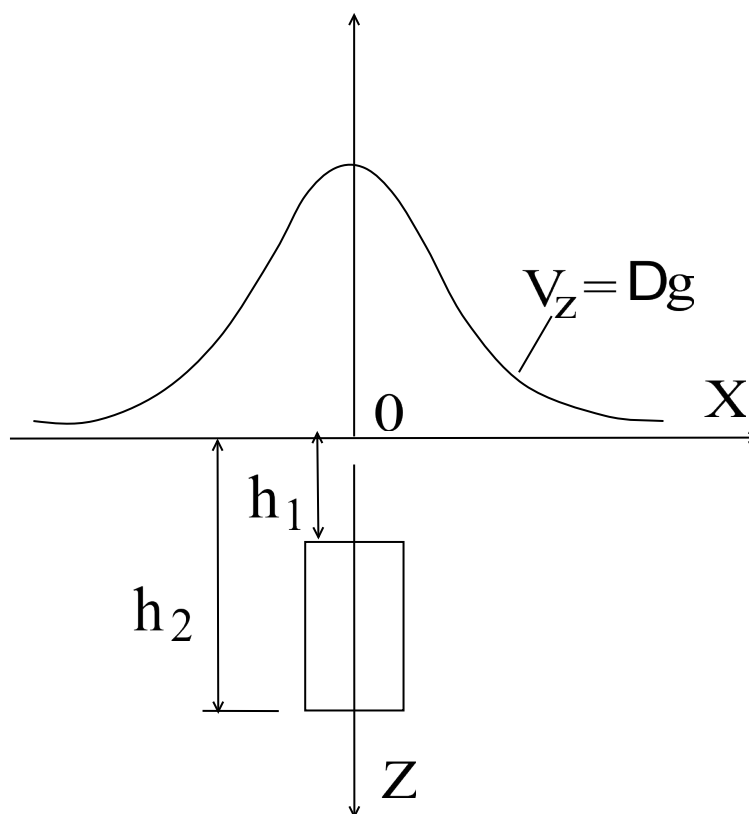


Рисунок 1.2 – Крива  $V_z$  над вертикальним циліндром.

*Вертикальний тонкий пласт* [1, 10] є модельним аналогом певних геологічних об'єктів при умові, що їхня горизонтальна товщина значно менша за вертикальну та менша за глибину залягання.

$$Dg(x,0) = f \cdot m \cdot \ln \frac{x^2 + h_2^2}{x^2 + h_1^2}; \quad (1.4)$$

де  $h_1$  та  $h_2$  - глибина залягання відповідно верхньої та нижньої кромки вертикального пласта.

Аномалії вертикального циліндра та вертикального тонкого пласта з горизонтальною потужністю рівною діаметру циліндра подібні за формою, однак останні суттєво більші за інтенсивністю та простяганням.

*Горизонтальний тонкий пласт* [1, 10] є модельним аналогом горизонтальних лінзоподібних, жиліоподібних тіл, горизонтальних шарів або великих площинних структур при умові, що їхні вертикальні розміри є значно менші за горизонтальні та менші за глибину залягання.

$$Dg(x,0) = 2 \cdot f \cdot m \cdot \left[ \arctg \frac{x+d}{h} - \arctg \frac{x-d}{h} \right]; \quad (1.5)$$

де  $h$  - глибина залягання середини горизонтального пласта,

$2 \cdot d$  - ширина пласта, розташованого симетрично відносно початку координат.

$m = s \cdot dh$  - поверхнева густина.

Аномалії від горизонтального тонкого пласта з вертикальною потужністю рівною діаметру горизонтального циліндра подібні за формою до відповідних кривих від циліндра, однак більш інтенсивні та суттєво більші за простяганням.

*Прямокутним паралелепіпедом* нескінченного простягання по вісі  $y$  [1, 11] тобто прямокутною призмою (рисунок 1.3), можуть бути описані безліч геологічних об'єктів, у тому числі прямокутні шахтні виробки. Формула розрахунку значень аномалії наступна:

$$\begin{aligned}
 Dg(x,0) = f \times & \left[ \ln \frac{(x_1 - x)^2 + z_2^2}{(x_1 - x)^2 + z_1^2} - (x_2 - x) \times \right. \\
 & \left. \ln \frac{(x_2 - x)^2 + z_2^2}{(x_2 - x)^2 + z_1^2} + \right. \\
 & \left. + 2z_2 \times \arctg \frac{(x_1 - x)}{z_2} - \arctg \frac{(x_2 - x)}{z_2} \right] \cdot \rho \\
 & + 2z_1 \times \left[ \arctg \frac{(x_2 - x)}{z_1} - \arctg \frac{(x_1 - x)}{z_1} \right] \cdot \rho \cdot \Delta \rho;
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

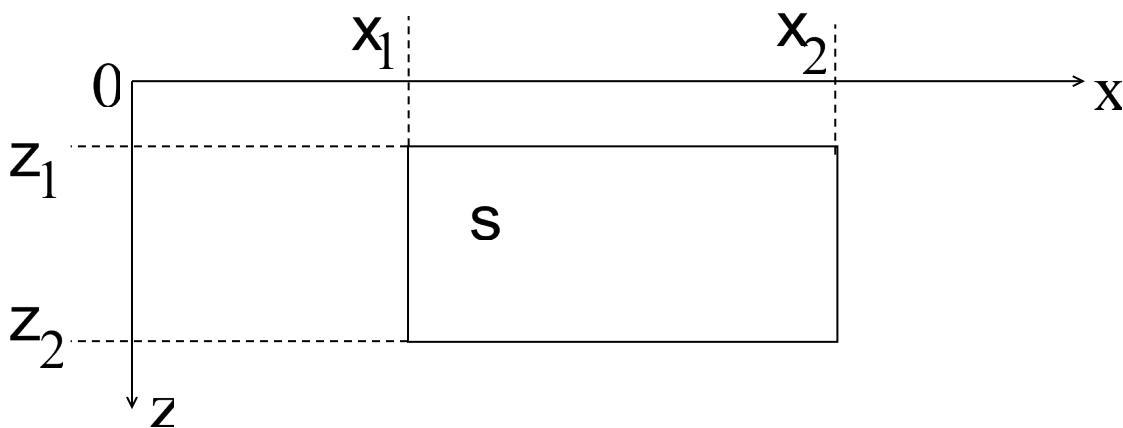


Рисунок 1.3 - Прямокутна призма в розрізі.

Основними критеріями вибору моделі є геометрична відповідність до реальної форми шахтної виробки, співвідношення між простотою розрахунків і необхідною точністю та наявність вхідних даних, таких як густина порід та геометричні розміри.

### 1.3 Вплив шахтних виробок на аномалії гравітаційного поля

Шахтні виробки змінюють природний розподіл мас у земній корі, що викликає локальні або регіональні аномалії гравітаційного поля. Ці аномалії зумовлені вилученням гірських порід та їх заміщенням повітрям,

заповнювачами з меншою густиною або техногенними матеріалами. Особливості впливу залежать від низки чинників:

### **1. Форма і розміри виробки**

- Великі та глибокі виробки (шахтні камери, тунелі, кар'єри) спричиняють помітні негативні аномалії, що можуть досягати значних амплітуд.
- Асиметричні або складні за геометрією виробки ускладнюють як аналітичні розрахунки гравітаційного ефекту, так і його інверсію для побудови просторової моделі мас [12].
- У відкритих розробках (кар'єрах) спостерігаються різкі контрасти між заповненими та порожніми зонами, що створює складну картину гравітаційного поля.

### **2. Густина гірських порід**

- Вилучення масивів щільних порід і заміщення їх порожниною (повітрям, водою, шламами) призводить до зменшення сили тяжіння в зоні виробки.
- Чим більша різниця густин між видаленою породою і матеріалом заповнення, тим більш вираженою є аномалія [13].
- У регіонах з високою природною неоднорідністю щільності (наприклад, чергування вапняків і вугілля) вплив виробок може накладатися на природні аномалії, ускладнюючи інтерпретацію.

### **3. Глибина залягання**

- Виробки, розташовані на невеликій глибині (до кількох сотень метрів), мають локалізовану, але інтенсивну аномалію.
- При глибшому заляганні виробок гравітаційний ефект стає менш вираженим по амплітуді, але поширюється на більшу площу, формуючи розтягнуту аномалію з менш чіткими межами [14].

### **4. Скупчення виробок**

- Група близько розташованих шахт або галерей створює складну комбіновану гравітаційну аномалію, яка не є простою сумою ефектів від кожної виробки.
- Взаємодія полів від сусідніх виробок може спричинити конструктивне або деструктивне накладення, що призводить до зміщення піку аномалії або спотворення її форми [15].

### **5. Техногенна активність та динаміка виробок**

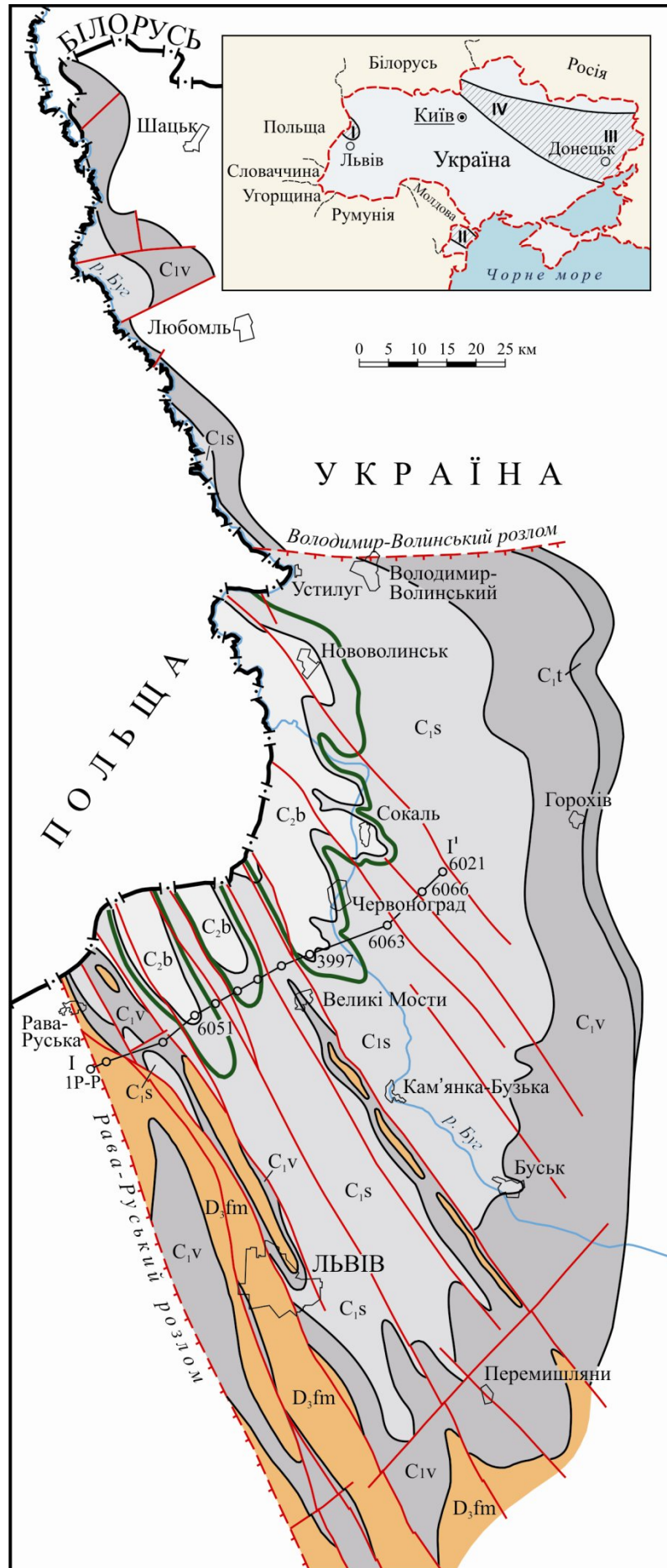
- Оскільки гірничі роботи є динамічним процесом, з часом змінюється як форма, так і заповнення виробки. Це призводить до еволюції гравітаційної аномалії.
- Поява нових порожнин, обвалення стінок, затоплення або засипка змінюють розподіл мас і, відповідно, викликають додаткові флуктуації поля тяжіння.

Таким чином, шахтні виробки можуть маскувати або імітувати природні геологічні структури, наприклад, грабени, розломи або порожнини карстового типу. Ігнорування їх впливу під час гравіметричної інтерпретації може призвести до серйозних помилок у побудові геологічних моделей. Для підвищення точності аналізу використовуються методи оберненого моделювання, тривимірна візуалізація розподілу щільності, а також врахування інженерно-геологічної документації щодо розташування та параметрів виробок.

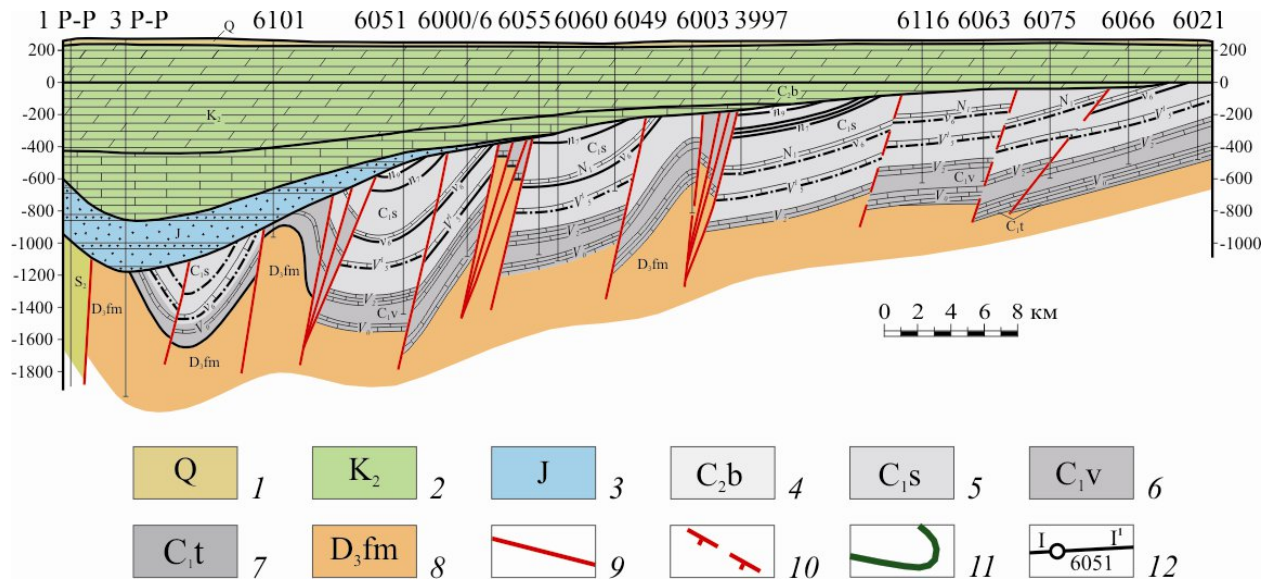
## 2 РОЗРАХУНОК АНОМАЛЬНИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ

### 2.1 Коротка геологічна характеристика району досліджень

Львівсько–Волинський кам'яновугільний басейн (ЛВБ) – це площа розвитку вугленосних відкладів із пластами вугілля нижнього (візейський та серпухівський яруси – візе, намюр А), а також середнього (низи башкирського яруса – намюр В, С, низи вест-фала А) карбона, яка розміщена на крайньому заході України у верхній течії р. Буг (рис. 2. 1) [16]. Вугленосні відклади утворюють паралічну нижньо-середньокарбонуву вугленосну формацію, яка поділяється на дві підформації. Площа поширення вугленосного карбону простягається в північно-західному напрямку від міст Львова і Перемишляни – на півдні до державного кордону з республікою Білорусь, на півночі на відстань понад 200 км при ширині до 90 км. Північна межа ЛВБ спочатку проходить по Володимир–Волинському (Північному) розломі, а потім, слід за смугою поширення нижньокам'яновугільних відкладів на західній окраїні Ковельського виступу, простягається вздовж Польсько-Українського кордону далі на північ і в районі Томашовки переходить на суміжню територію Польщі. Східна межа басейну на схід від Луцька простягається в меридіальному напрямку і на півдні центриклінально замикається південніше м. Львова. Південно-західна межа має тектонічну природу і співпадає з Рава-Руським розломом. В межах України західна границя ЛВБ є відкритою і кам'яновугільні вугленосні відклади занурюються під більш молоді утворення на території Польщі. У вказаних межах загальна площа басейну перевищує 10 000 км<sup>2</sup>. Територія з промисловою вугленосністю становить близько 1 000 км<sup>2</sup> (рис. 2.2). ЛВБ є південно-східним продовженням Люблінського вугільного басейну (ЛБ), який розміщений на території Польщі. В сукупності вони утворюють генетично єдиний Львівсько-Люблінський басейн, що розміщений в межах однойменного тектонічного прогину. [16]



а



б

Рисунок 2.1 – Геологічна карта (а) і розріз (б) Львівсько-Волинського басейну

1 – утворення мезозою і кайнозою, 2 – 5 – кам'яновугільний період (*середній відділ*: 2 – башкирський ярус; *нижній відділ*: 3 – серпуховський ярус, 4 – візейський ярус, 5 – турнейський ярус), 6 – девон верхній відділ, 7 – розривне тектонічне порушення, 8 – регіональний розлом, 9 – контур промислової вугленосності; 10 – лінія геологічного розрізу, 11 – лінія фаціально-палеоекологічного профіля, 12 – бурова свердловина з об'єктом вивчення керну. Розташування карбонових вугільних басейнів і вугленосних площ (на врізці): I–III – басейни (I – Львівсько-Волинський, II – Переддобрудженський, III – Донецький), IV – Дніпровсько-Донецька площа.

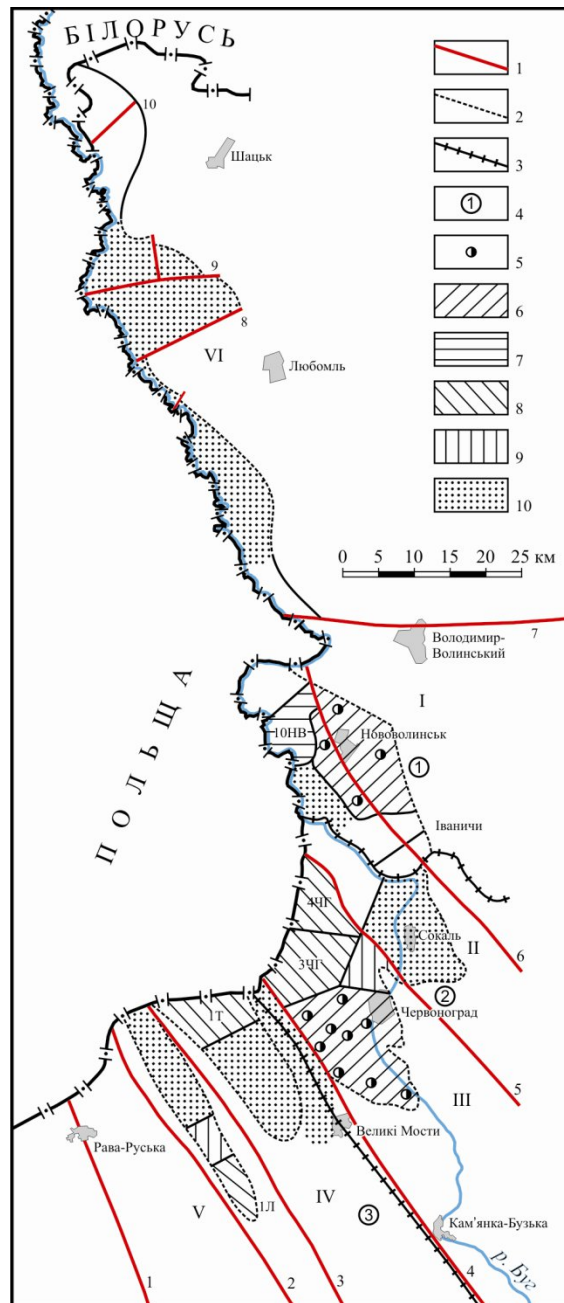


Рисунок 2.2 – Схематична геолого-промислова карта сучасного ЛВБ

1 – тектонічні порушення (арабські цифри): *розломи*: 1 – Рава-Руський, 7 – Володимир-Волинський (Північний); *зони насувів*: 2 – Нестерівська, 3 – Бутин-Хлівчанська, 4 – Белз-Милятинська; *скиди*: 5 – Забузький, 6 – Волинський; 8 – Любомльський; 9 – Швацький; 10 – Піщанський; 2 – контур промислової вугленості; 3 – межі геолого-промислових і вугленосних районів; 4 – райони (арабські цифри в кружках): 1 – Ново волинський, 2 – Червоноградський, 3 – Південно-Західний; 5 – шахти; 6 – діючі шахти; 7 – шахти, які будуються; 8 – резервні ділянки для будівництва і реконструкції шахт; 9 – розвідувальні ділянки; 10 – перспективні для розвідки ділянки, площі; *вугільні родовища*: I – Волинське, II – Забузьке, III – Межиріченське, IV – Тяглівське, V – Любельське; VI – Ковельська перспективна вугленосна площа; *поля шахт*: 10Н – № 10 Нововолинська, 3ЧГ – № 3 Червоноградська, 4ЧГ – № 4 Червоноградська, 1Т – № 1 Тяглівська, 1Л – № 1 Любельська.

### ***Стратиграфія***

Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн – найзаглибленіша частина Львівського палеозойського прогину. Сучасна межа басейну відповідає крайнім виходам найнижчих шарів візейського ярусу, які на сході, південному сході і півдні зафіксовані по лінії населених пунктів Торчин, Берестечко, Заболотці, Золочів, Нові Стрілища, Щирець, а на півночі та заході проходить по регіональних розломах – Володимир-Волинському і Рава-Руському, та на північному заході співпадає з кордоном з Польщею.

Потужна осадова товща, що складає розріз Львівсько-Волинського басейну, залягає на гетерогенній поверхні архей-протерозойського метаморфічного фундаменту. За даними сейсмічного зондування кристалічний фундамент у західній частині Львівського прогину занурений на глибину більше 7–8 км. За межами басейну фундамент найбільш припіднятий на Ратнівському горсті, який складено гнейсами, мігматитами і аплітовими гранітами. На Великомоствівській газоносній площі бурінням розкритий 3,5 кілометровий розріз осадового чохла, що складений відкладами верхнього силуру, девону, карбону, юри, крейди та неогену. Утворення ордовику, кембрію і рифею відомі на територіях, що примикають до Львівського прогину або облямовують його (Волинський виступ, Український щит, Поділля, Зовнішня зона Передкарпатського прогину). [16]

### ***Тектоніка***

Вуглеутворення – один з регіональних геологічних процесів, що протікав і відновлювався при сприятливому співвідношенні тектонічних, кліматичних, геоморфологічних, фітоценологічних й ін. факторів. Великі епохи вуглеутворення відносяться до періодів повільних коливальних рухів земної кори на тлі загального тривалого занурення великих областей й ділянок. [16]

Для вуглеутворення істотне значення мали виникнення в нижньому палеозої наземної рослинності і її еволюція в наступній історії Землі. Наявність в осадових товщах гумусового вугілля загалом відзначається із силуру, а нагромадження органічної речовини, з якої утворилось вугілля промислового

значення в межах України – в карбоні. Слід зазначити, що в середньому палеозої розвиток вологолюбних вуглеутворюючих рослин обмежувався розміщенням областей нагромадження органіки приморськими рівнинами, а переважні зони зростання були поширені у Північній півкулі на території древнього північного материка Лавразія, зокрема, в межах його древньої Руської платформи. Зрозуміло, що Північна півкуля у вигляді древнього материка Лавразії в порівнянні з південною Гондваною, яка відділялась від Лавразії палеоокеаном, в палеозої мала більш придатні умови для формування і розвитку рослинного життя. Це знайшло свій відбиток у виникненні й поширенні основних мас вищих рослин, що дійшли до нас у вигляді покладів вугілля, наприклад, Львівсько-Люблінського кам'яновугільного басейну. Подібна “картина” повністю повторюється й у наш час у вигляді повної аналогії поширення родючих ґрунтів, заснованих на тих же гумінових з'єднаннях. [16]

Сучасні дослідження світової геологічної науки в області палеодинаміки Землі, зокрема в проведенні реконструкцій розташування, переміщення і границь літосферних плит минулих геологічних епох на основі мобілістичних уявлень про переміщення континентів і зміни океанів у фанерозої, суттєво змінили уявлення про тектонічні процеси і механізми формування древніх басейнів седиментації, у тому числі і вугільних. [16]

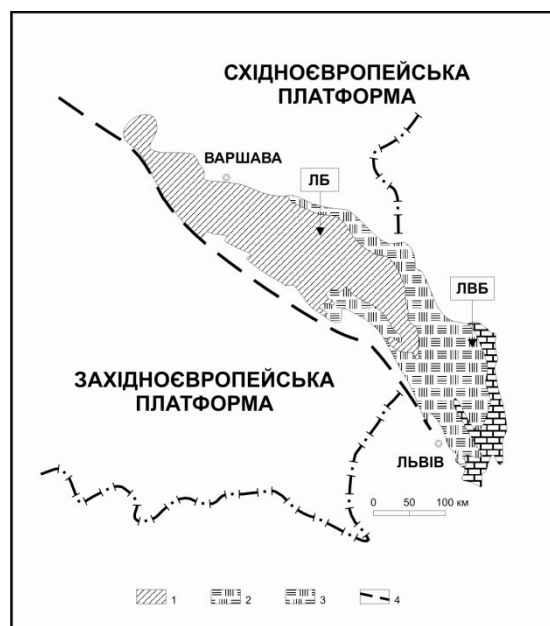
Еволюція регіону на протязі геологічного часу формування кам'яновугільного басейну дозволяє скласти уявлення про послідовність основних тектонічних подій, їхній вік, утворення і розташування в загальній структурі південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи. Так впродовж карбону простежується зближення континентів, яке проходило з пізнього девону. Зокрема, зазначається, що широке нагромадження фітомаси приурочено в основному до гумідних умов екваторіального поясу, яке потужною смугою протягалося через Північну Америку і Європу. Зазначається також, що в пізньому карбоні південні райони Східноєвропейської платформи займали приекваторіальне (між 0–5° і 15–20°) широтне положення. На відміну

від древнього положення сучасний ЛВБ розташований в північній півкулі між  $49^\circ$  і  $52^\circ$  і має північно-західне простягання. [16]

*Сучасне розташування басейну у загальній геологічній структурі регіону*

Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн розташований в межах більш крупного і протяжного Львівсько-Люблінського палеозойського прогину південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи (СЄП) і складає його українську частину – центриклінальне закінчення (рис. 2.3). У загальному плані південно-західна окраїна СЄП простягається з північного заходу на південний схід від Балтійського до Чорного моря, а ЛВБ це лише окремий елемент герцинського етапу геотектонічного розвитку окраїни платформи. [16]

Розміщення Львівського палеозойського прогину відносно оточуючих потужних геологічних структур показано на рис. 2.4. Вважається, що блокова тектоніка кристалічного фундаменту, на якому моноклінально залягають палеозойські породи, була каркасом для закладення в цьому регіоні фанерозойських структур. Основною і заключною ланкою у геотектонічному формуванні Львівського палеозойського прогину, який перекриває пізньодевонський прогин, є карбонові відклади ЛВБ, які представлені турнейським, візейським, серпуховським ярусами нижнього відділу і частиною башкирського ярусу середнього відділу карбону (верхній візе-вестфал А),



## Рисунок 2.3 – Схема розташування ЛВБ и ЛБ

Карбонові вугленосні формації: 1 – континентальна; 2 – морсько-паралічна; 3 – довугленосні, переважно карбонатні відклади; 4 – межа ССП.

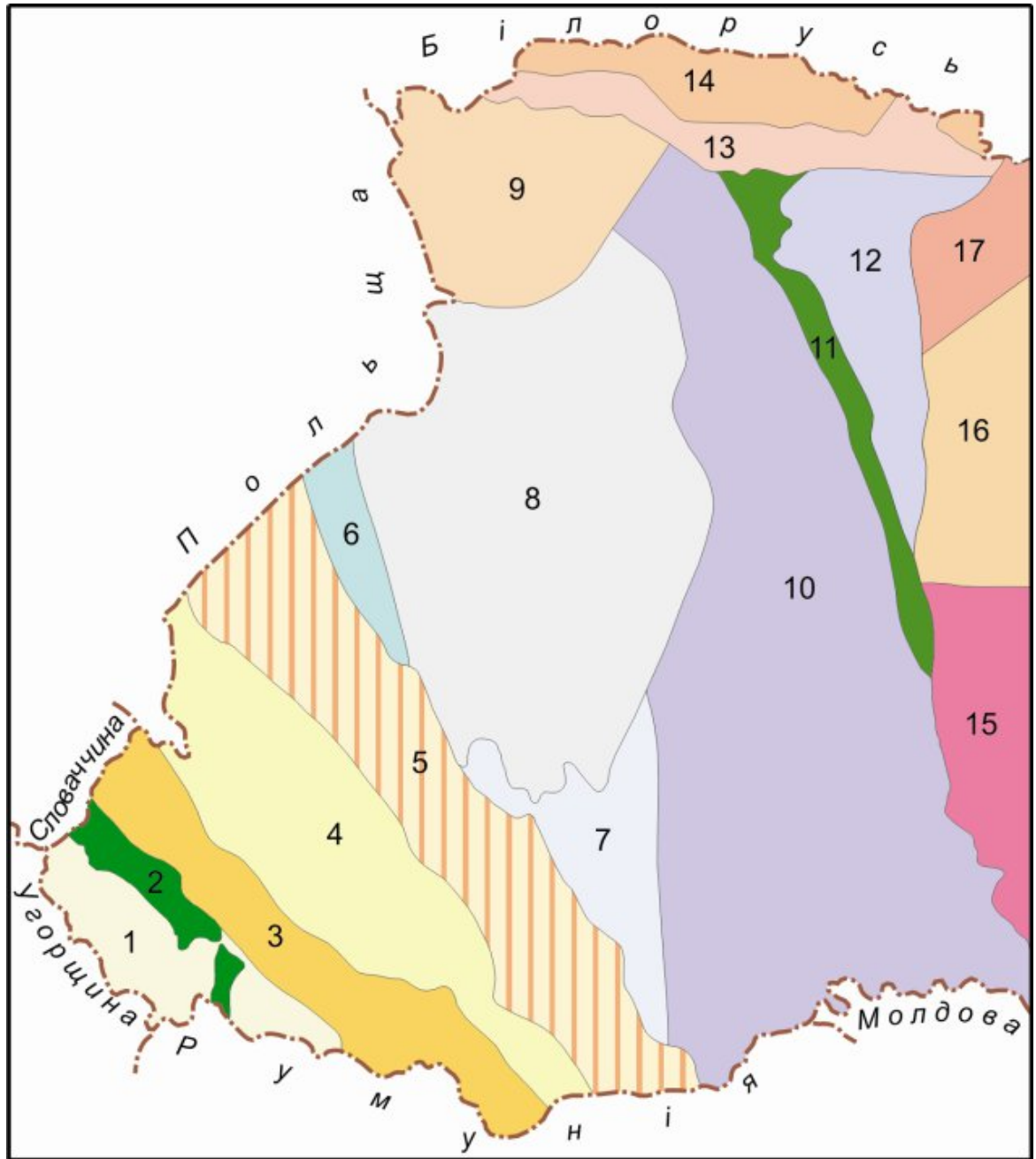


Рисунок 2.4 – Схема тектонічного районування заходу України,

Карпатський меганапнорій (1–5): 1 – Закарпатський внутрішній прогин, 2 – Вигорлат-Гутинська вулканогенна зона (гряда), 3 – Мармароський масив, зона Скель і внутрішні флішові покриви, 4 – зона Кросно та Скибовий покрив, 5 – Передкарпатський прогин; Західноєвропейська платформа: 6 – Рава-Руська епіорогенна зона; Східноєвропейська платформа (7–17): Волино-Подільська плита (7–14): 7 – Боянецький прогин, 8 – Львівський палеозойський прогин, 9 – Ковельський виступ, 10 – Волино-Подільська монокліналь, 11 – Волинські трапи, 12 – Волино-Подільський прогин, 13 – Північноукраїнська горстові зона,

14 – Поліська сідловина, *Український щит* (15–17), мегаблоки: 15 – Дністровсько-Бузький; 16 – Волинський, 17 – Волино-Подільський плутонічний пояс.

виповнюють його більш занурену частину і мають потужність близько 1500м. При цьому глибина залягання кристалічного фундаменту сягає 8–10 км.

Кам'яновугільні відклади ЛВБ розташовані в межах західної частини Ковельського виступу і Львівського палеозойського прогину на південно-західній окраїні Східноєвропейської платформи. Вона простягається в субмеридіональному напрямку уздовж державного кордону з Польщею від Білорусі на півночі до широти 49° 25' південніше м. Львова на відстань понад 175 км. Північно-західна границя поширення формації проводиться по Ковельському тектонічному виступу, який є частиною Ковельсько-Хрубешувського поперечного підняття, що розділяє Львівсько-Люблінський прогин на Львівський і Люблінський; північна і південно-західна – відповідно по Володимир-Волинському (Північному) і Рава-Руському розломам. З північного сходу формація обмежується виходом осадово-вулканогенних порід кембрійської і силурійської систем, зі сходу і півдня – утвореннями середнього і верхнього відділів девонської системи. [16]

Слід відзначити, що положення південно-західної границі Східноєвропейської платформи дослідниками приймається по-різному. Зокрема, пропонується палеозойського прогину і безпосередньо прилягають до каледонід та їх передовим прогином (Белз-Балученський розлом, Белз-Милятинська зона насувів). За дослідженнями, вона проходить вздовж зони глибинних розломів (Коцького, Володимир-Волинського, Радехівського і Коржевського). Інші автори проводять її по Рава-Руському розлому. Проте, і до цього часу питання вияснення просторового положення і проведення границі Східноєвропейської платформи остаточно не з'ясовано. Разом з тим “пошук таких границь, які знаходяться при цьому неодмінно в різному географічному положенні і на різних глибинних зрізах надзвичайно важливий як з точки зору

регіональної тектоніки, так і в прикладному відношенні, передусім, у зв'язку з пошуками родовищ корисних копалин і, в першу чергу, нафти і газу". [16]

## 2.2 Вибір геометричних та параметричних моделей шахтних виробок

Однією з важливих умов, яка визначає успіх застосування конкретного геофізичного методу, зокрема гравірозвідки, є рівень завад як геологічного, так і негеологічного походження. У регіонах активного підземного вуглевидобутку, таких як Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн, техногенні фактори істотно впливають на результати гравіметричних досліджень.

Проведення очисних виробок супроводжується відбором значних об'ємів гірських порід, що призводить до утворення зон із зниженою густиною – порожнин, тріщинуватих або розущільнених масивів. Ці зони викликають локальні негативні гравітаційні аномалії, які необхідно враховувати при моделюванні та інтерпретації гравітаційного поля. Ігнорування впливу таких техногенних структур може спричинити помилки у визначенні глибини залягання геологічних тіл, їхніх розмірів та густини.

Параметри, які враховуються при побудові моделей шахтних виробок:

### 1. Геометричні характеристики:

- Форма виробки: найчастіше моделюється як циліндр (вертикальні стовбури), паралелепіпед або витягнута пластина (очисні забої, галереї).
- Розміри: довжина, ширина та висота виробки залежать від типу розробки та технології добування. У розрахунках часто використовуються усереднені параметри, що відповідають типовим інженерним проектам.
- Глибина залягання: суттєво впливає на амплітуду гравітаційного ефекту. Чим глибше виробка, тим слабкіший її сигнал на поверхні, але з більшим радіусом впливу.

### 2. Параметричні характеристики:

- Густина заповнення: для порожнин зазвичай приймають густину повітря ( $\sim 1.2 \text{ кг/м}^3$ ), або води ( $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$ ), у разі затоплення.
- Густина навколишніх порід: дані отримуються з каротажу, лабораторних вимірювань або літературних джерел. Наприклад, для вугленосних товщ Львівського басейну середня густина може коливатись у межах  $2200\text{--}2700 \text{ кг/м}^3$ .
- Товщина пластів: згідно з даними дослідників [16], поклади вугілля у Львівському вугільному басейні мають потужність від 0,05 до 2,5 м. Робочими є до 30 пластів, серед яких поширені пласти потужністю близько 1,5 м, а іноді — більше 2,0 м. Такі параметри мають ключове значення для побудови точних моделей, оскільки визначають об'єм вилученої маси.

### 3. Тип виробки та її етап:

- Очисні виробки: характеризуються активною фазою добування з найбільшим впливом на гравітаційне поле.
- Засипані або законсервовані виробки: можуть частково втрачати свою гравітаційну виразність залежно від типу засипки.
- Затоплені виробки: ефект від виробки з водяним заповненням буде проміжним між повністю повітряною порожниною та навколишніми породами.

Моделювання таких виробок у гравіметричних задачах виконується за допомогою простих геометричних тіл – сфер, прямокутних призм, пластин, або за допомогою чисельного розв'язання рівнянь потенційного поля (метод скінченних різниць або елементів). Вибір моделі залежить від бажаної точності, доступної інформації та обчислювальних ресурсів.

Таким чином, грамотний вибір геометричних і параметричних моделей дозволяє мінімізувати похибки при інтерпретації гравітаційних даних у районах з активною гірничою діяльністю, забезпечуючи більш достовірні геофізичні рішення.

Виходячи з вищенаведених характеристик створено геологічну схему профілю (рисунок 2.5), розташованого вхрест простягання вугільного пласта з відповідними геометричними характеристиками (таблиця 2.1) та ефективними густинними властивостями (таблиця 2.2).

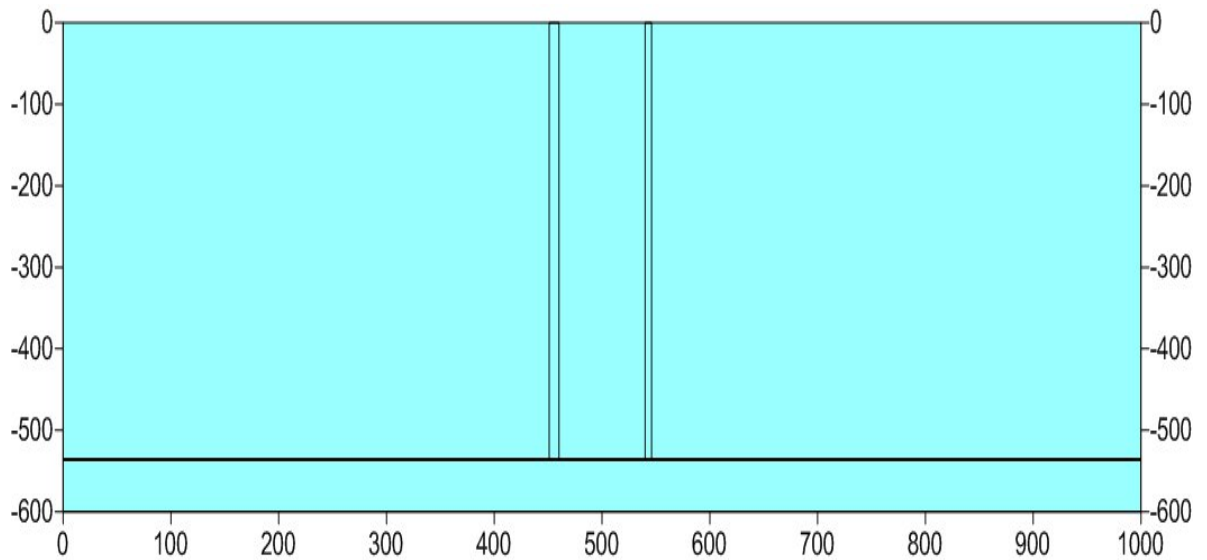


Рисунок 2.5 - Геологічна схема профілю

Таблиця 2.1 - Геометричні характеристики виробок

Очисна виробка				Головний стовбур		Допоміжний стовбур	
протяжність, м	потужність, м	глибина мін., м	глибина макс., м	діаметр, м	глибина, м	діаметр, м	глибина, м
1000	2	535	537	9	537	6	537

Таблиця 2.2 - Геогустинні характеристики моделей

	Вміщуючі породи	Гірничі виробки		
		вугілля	вода	повітря
Густина, г/см <sup>3</sup>	2,560	1,426	1,000	0,002

### 2.3 Чисельні методи та програмні комплекси для моделювання гравітаційних аномалій

Гравітаційне аномальне поле від такої моделі можна записати в аналітичному вигляді як суму теоретичних ефектів  $V_m(x,0)$ , що розраховуються за формулами 1- 6 [1]:

$$V_S(x,0) = \sum_{m=1}^M V_m(x,0) \quad 7$$

де  $M$  – кількість елементарних тіл у геологічній схемі.

Для врахування мінімального та максимального гравітаційного ефекту розрахунки проведено для двох випадків [17]:

- 1) геологічний розріз представлено вугільним пластом та вміщуючими породами;
- 2) геологічна схема доповнена двома вертикальними гірничими виробками – головним та допоміжним шахтними стовбурами.

Оскільки закриття шахт, як правило, відбувається шляхом затоплення виробленого простору, то для кожного з вищеперерахованих варіантів геологічних схем прямий гравітаційний ефект розраховувався як у припущенні заповнення виробленого простору повітрям, так і з врахуванням заповнення виробленого простору водою (закриті шахти) [17].

Розрахунок гравітаційного ефекту від створених геологічних схем, проведено шляхом рішення прямих задач гравірозвідки з використанням комп'ютерної системи Mathcad. Вугільний пласт апроксимовано горизонтальним тонким пластом, вертикальні стовбури – тонкими вертикальними пластами. Крок дискретизації моделі вздовж осі  $X$  - 0,5 м.

Процес визначення аномального гравітаційного ефекту проводився у наступній послідовності:

- 1) створення структурної частини геологічної схеми шахтного поля;
- 2) визначення ефективних густин;

3) розрахунок аномальних гравітаційних полів, що створюють моделі, вироблений простір яких заповнено в одному випадку повітрям, в іншому водою за умови, що модель містить тільки горизонтальні виробки (рис. 2.6-2.8);

4) розрахунок аномальних гравітаційних полів, що створюють моделі, вироблений простір яких заповнено в одному випадку повітрям, в іншому водою за умови, що модель окрім горизонтальної виробки містить головний та допоміжний вертикальні стовбури (рис. 2.9-2.11);

5) розрахунок статистичних характеристик, отриманих аномальних гравітаційних полів.

$$x := -500..-499.5..500$$

$$f := 6.673 \cdot 10^{-11} \quad \text{Гравітаційна стала}$$

$$h := 536 \quad \text{Глибина залягання середини горизонтального пласта}$$

$$d := 1 \quad \text{Половина товщини пласта}$$

$$\sigma_1 := -2300 \quad \text{Ефективна густина при заповненні повітрям}$$

$$\sigma_2 := -1300 \quad \text{Ефективна густина при заповненні водою}$$

$$\mu_1 := \sigma_1 \cdot 2d \quad \text{Поверхнева густина при заповненні повітрям}$$

$$\mu_2 := \sigma_2 \cdot 2d \quad \text{Поверхнева густина при заповненні водою}$$

$$\Delta g_1(x) := 2 \cdot f \cdot \mu_1 \cdot \left( \operatorname{atan} \left( \frac{x+d}{h} \right) - \operatorname{atan} \left( \frac{x-d}{h} \right) \right) \cdot 10^5$$

$$\Delta g_2(x) := 2 \cdot f \cdot \mu_2 \cdot \left( \operatorname{atan} \left( \frac{x+d}{h} \right) - \operatorname{atan} \left( \frac{x-d}{h} \right) \right) \cdot 10^5$$

Рисунок 2.6 – Лістинг 1 програми розрахунку гравітаційних ефектів від горизонтальних гірничих виробок

$\Delta g1(x) =$
$-1.225 \cdot 10^{-4}$
$-1.226 \cdot 10^{-4}$
$-1.227 \cdot 10^{-4}$
$-1.228 \cdot 10^{-4}$
$-1.229 \cdot 10^{-4}$
$-1.231 \cdot 10^{-4}$
$-1.232 \cdot 10^{-4}$
$-1.233 \cdot 10^{-4}$
$-1.234 \cdot 10^{-4}$
$-1.235 \cdot 10^{-4}$
$-1.236 \cdot 10^{-4}$
$-1.237 \cdot 10^{-4}$
$-1.239 \cdot 10^{-4}$
$-1.24 \cdot 10^{-4}$
$-1.241 \cdot 10^{-4}$
...

$\Delta g2(x) =$
$-6.923 \cdot 10^{-5}$
$-6.93 \cdot 10^{-5}$
$-6.936 \cdot 10^{-5}$
$-6.943 \cdot 10^{-5}$
$-6.949 \cdot 10^{-5}$
$-6.955 \cdot 10^{-5}$
$-6.962 \cdot 10^{-5}$
$-6.968 \cdot 10^{-5}$
$-6.975 \cdot 10^{-5}$
$-6.981 \cdot 10^{-5}$
$-6.988 \cdot 10^{-5}$
$-6.994 \cdot 10^{-5}$
$-7.001 \cdot 10^{-5}$
$-7.007 \cdot 10^{-5}$
$-7.014 \cdot 10^{-5}$
...

Рисунок 2.7 – Лістинг 2 програми розрахунку гравітаційних ефектів від горизонтальних гірничих виробок

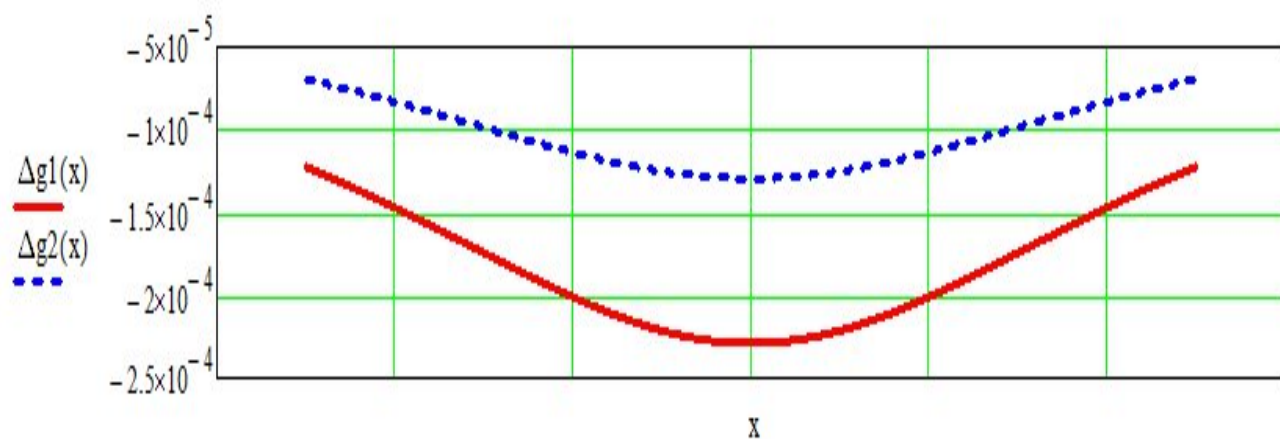


Рисунок 2.8 – Аномальний гравітаційний ефект при насиченні очисної гірничої виробки водою (синя крива) та повітрям (червона крива)

$x := 0.0.5..1000$		
$f := 6.673 \cdot 10^{-11}$	Гравітаційна стала	
$h1 := -0.1$	Глибина залягання верхньої кромки пласта	
$h2 := 537$	Глибина залягання нижньої кромки пласта	
$d1 := 4.5$	Половина товщини основного стовбура	
$d2 := 3$	Половина товщини допоміжного стовбура	
$\sigma1 := -2300$	Ефективна густина при заповненні повітрям	
$\sigma2 := -1300$	Ефективна густина при заповненні водою	
$\mu1 := \sigma1 \cdot 2d1$	Поверхнева густина при заповненні повітрям	$\mu12 := \sigma1 \cdot 2d2$
$\mu2 := \sigma2 \cdot 2d1$	Поверхнева густина при заповненні водою	$\mu22 := \sigma2 \cdot 2d2$
$\xi1 := 455.5$		
$\xi2 := 543$		

Рисунок 2.9 – Лістинг 1 програми розрахунку гравітаційних ефектів від моделі, що включає горизонтальні та вертикальні гірничі виробки

$$\Delta g1(x) := f \cdot \mu1 \cdot \ln \left[ \frac{(x - \xi1)^2 + h2^2}{(x - \xi1)^2 + h1^2} \right] \cdot 10^5$$

$$\Delta g2(x) := f \cdot \mu12 \cdot \ln \left[ \frac{(x - \xi2)^2 + h2^2}{(x - \xi2)^2 + h1^2} \right] \cdot 10^5$$

$$\Delta g3(x) := \Delta g1(x) + \Delta g2(x)$$

$$\Delta g4(x) := f \cdot \mu2 \cdot \ln \left[ \frac{(x - \xi1)^2 + h2^2}{(x - \xi1)^2 + h1^2} \right] \cdot 10^5$$

$$\Delta g5(x) := f \cdot \mu22 \cdot \ln \left[ \frac{(x - \xi2)^2 + h2^2}{(x - \xi2)^2 + h1^2} \right] \cdot 10^5$$

$$\Delta g6(x) := \Delta g4(x) + \Delta g5(x)$$

Рисунок 2.10 – Лістинг 2 програми розрахунку гравітаційних ефектів від моделі, що включає горизонтальні та вертикальні гірничі виробки

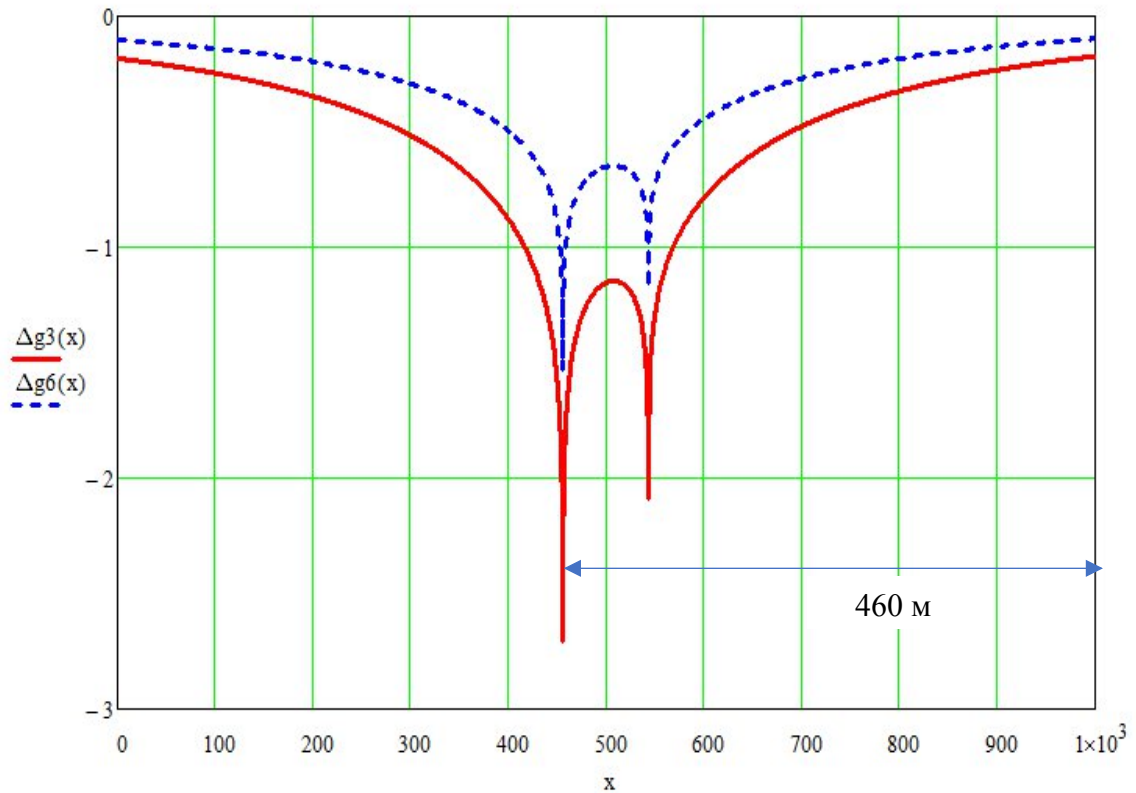


Рисунок 2.11 – Аномальний гравітаційний ефект при насиченні горизонтальної та вертикальних виробок водою (синя крива) та повітрям (червона крива)

З метою перевірки достовірності та підвищення точності результатів, отриманих у першій частині дослідження, було застосовано альтернативний підхід до розрахунку аномального гравітаційного ефекту, використовуючи інше геометричне уявлення гірничих виробок та іншу програмну платформу.

На відміну від початкової моделі, де гірничі виробки моделювались у вигляді вертикальних пластів, у новому підході для розрахунків були використані вертикальні циліндри. Така заміна дозволяє точніше врахувати просторову конфігурацію виробок та дає змогу порівняти вплив різної геометрії на результати моделювання.

Розрахунки були виконані у програмі Mathcad, яка забезпечує високу точність математичного моделювання та зручність візуалізації результатів. В обчисленнях враховувались два варіанти заповнення виробок: водою та повітрям. Як і в попередній моделі, для кожного з варіантів було побудовано

графік гравітаційної аномалії, де синя крива відповідає насиченню водою, а червона — повітрям. (рис. 2.14)

Такий підхід дозволяє не лише провести порівняльний аналіз результатів, отриманих двома методами (заміна пластами і циліндрами), але й оцінити вплив геометричної форми об'єкта на величину гравітаційної аномалії. Отримані результати є важливими для подальшої інтерпретації та уточнення геофізичної моделі досліджуваного району.

$R1 := 4.5$       Радіус основного стовбура

$R2 := 3$       Радіус основного стовбура

$\Delta S1 := \pi \cdot R1^2$       Площа поперечного перерізу основного стовбура

$\Delta h1 := 9$       Половина товщини основного стовбура

$\Delta h2 := 3$       Половина товщини допоміжного стовбура

$\lambda1 := \sigma1 \cdot \Delta S1$       Лінійна густина основного стовбура при заповненні повітрям

$\lambda2 := \sigma2 \cdot \Delta S1$       Лінійна густина основного стовбура при заповненні водою

$\Delta S2 := \pi \cdot R2^2$       Площа поперечного перерізу допоміжного стовбура

$\lambda3 := \sigma1 \cdot \Delta S2$       Лінійна густина допоміжного стовбура при заповненні повітрям

$\lambda4 := \sigma2 \cdot \Delta S2$       Лінійна густина допоміжного стовбура при заповненні водою

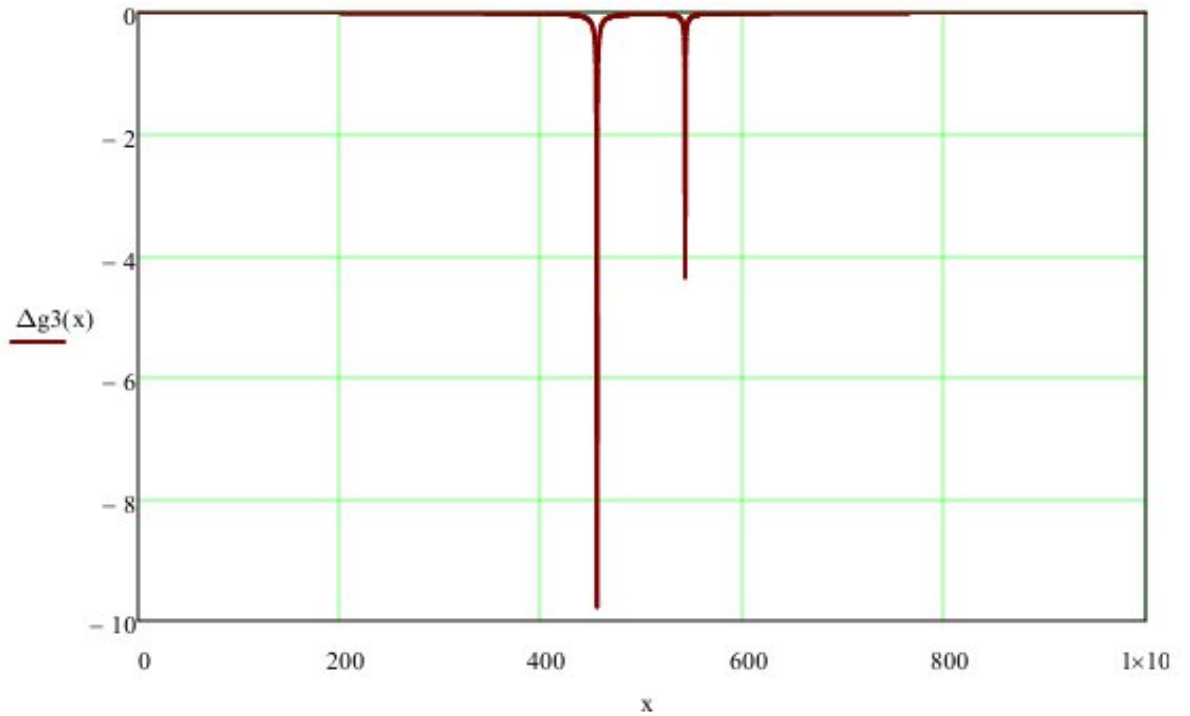


Рисунок 2.12 – Аномальний гравітаційний ефект при насиченні горизонтальної та вертикальних виробок повітрям з використанням комп'ютерної системи Mathcad.

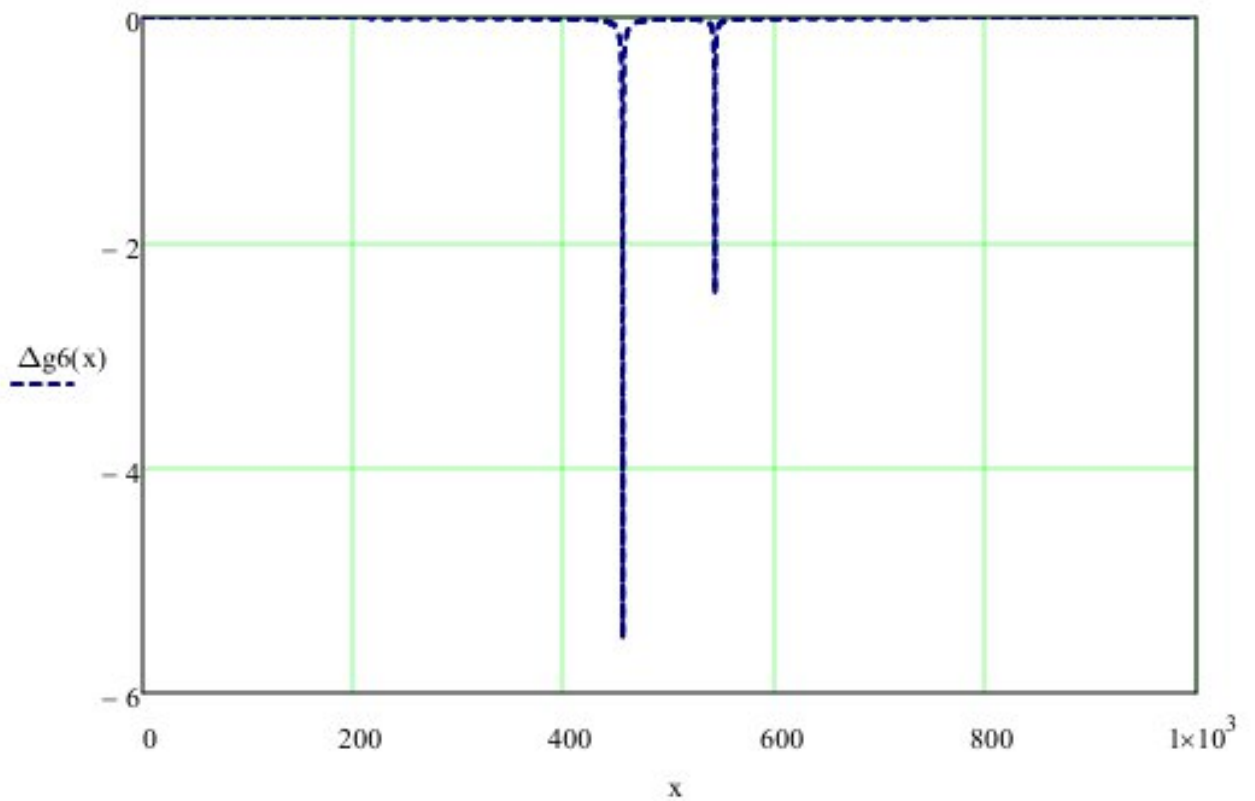


Рисунок 2.13 – Аномальний гравітаційний ефект при насиченні горизонтальної та вертикальних виробок водою з використанням комп'ютерної системи Mathcad

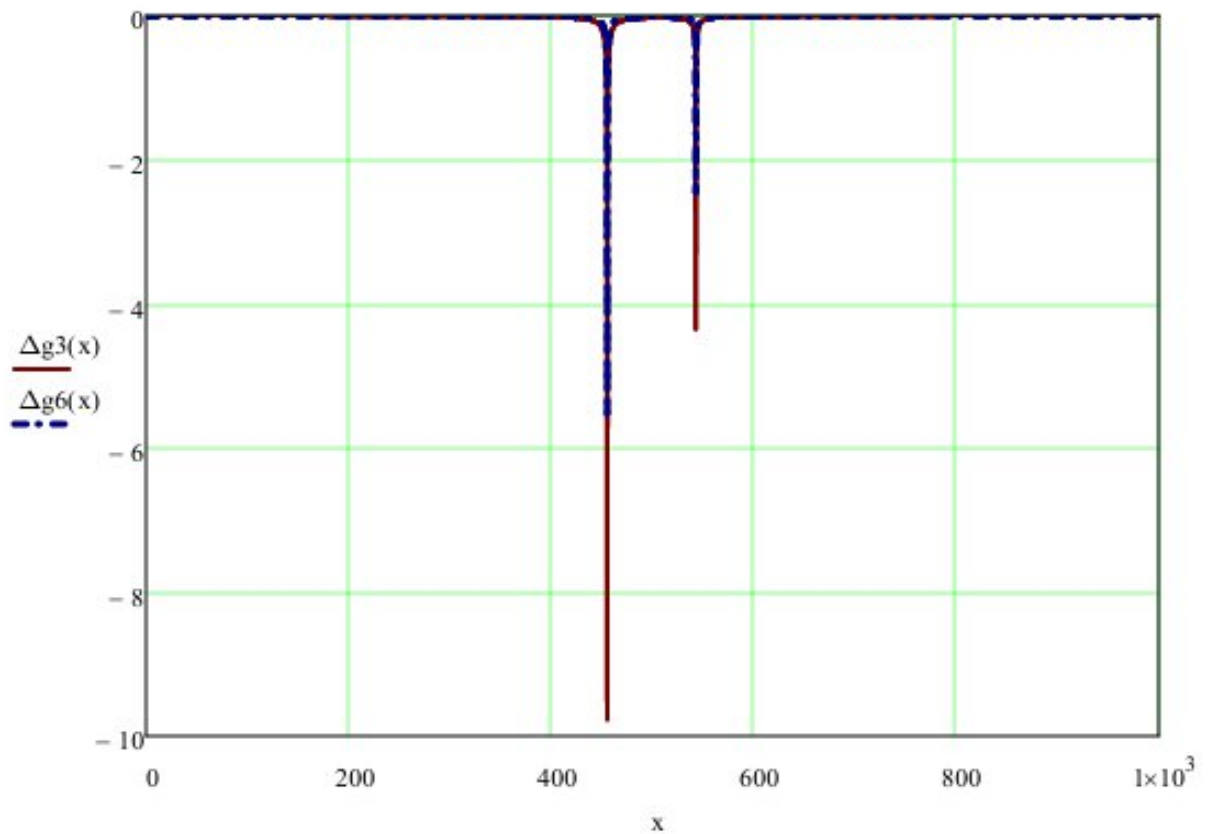


Рисунок 2.14 – Аномальний гравітаційний ефект при насиченні горизонтальної та вертикальних виробок водою (синя крива) та повітрям (червона крива) з використанням комп'ютерної системи Mathcad

Порівняння результатів двох підходів до моделювання аномального гравітаційного ефекту засвідчує наявність суттєвих відмінностей у значеннях гравітаційної аномалії, зумовлених геометрією моделі.

Це свідчить про те, що модель з використанням вертикальних пластів демонструє вищу чутливість до зміни щільності заповнювача, що, ймовірно, обумовлено більшим геометричним контрастом у розподілі мас. У свою чергу, циліндрична модель характеризується більш рівномірним розподілом мас та менш вираженим ефектом від зміни середовища заповнення, що може бути наслідком згладженого впливу на гравітаційне поле.

Такий аналіз підтверджує необхідність врахування геометричної конфігурації об'єкта при побудові моделей гравітаційної аномалії, а також

дозволяє обґрунтовано вибирати підхід залежно від конкретних геологічних умов та цілей дослідження.

Після побудови графіків гравітаційних аномалій для кожного з розглянутих випадків було виконано додатковий аналіз отриманих результатів. З метою кількісного оцінювання впливу типу заповнення виробленого простору (водою або повітрям) на гравітаційне поле, у середовищі Excel було проведено розрахунок описової статистики для дельта-значень. Аналіз включав визначення середнього значення, стандартного відхилення, мінімальних та максимальних значень, що дозволило здійснити порівняльну оцінку моделей та зробити висновки щодо інтенсивності відповідних гравітаційних ефектів.

<i>Горизонтальний пласт, заповнений повітрям</i>	
Середнє	-0,00018431
Стандартна похибка	0,00000076
Медіана	-0,00018810
Мода	-0,00022900
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,00003412</b>
Дисперсія вибірки	0,00000000
Ексцес	-1,31076159
Асиметричність	0,24563410
Інтервал	0,00010660
<b>Мінімум</b>	<b>-0,00022910</b>
Максимум	-0,00012250
Сума	-0,36879730
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00012250
Найменший(1)	-0,00022910

Таблиця 2.3 – Описова статистика горизонтального пласта заповненого повітрям

<i>Горизонтальний пласт, заповнений водою</i>	
Середнє	-0,00010417
Стандартна похибка	0,00000043
Медіана	-0,00010630
Мода	-0,00012940
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,00001929</b>
Дисперсія вибірки	0,00000000
Ексцес	-1,31072828
Асиметричність	0,24569140
Інтервал	0,00006027
<b>Мінімум</b>	<b>-0,00012950</b>
Максимум	-0,00006923
Сума	-0,20845154
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00006923
Найменший(1)	-0,00012950

Таблиця 2.4 – Описова статистика горизонтального пласта заповненого  
ВОДОЮ

<i>Вертикальний пласт, заповнений повітрям</i>	
Середнє	-0,54614493
Стандартна похибка	0,00843089
Медіана	-0,40400000
Мода	-0,18400000
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,37713501</b>
Дисперсія вибірки	0,14223081
Ексцес	1,64485580
Асиметричність	-1,39002134
Інтервал	2,53500000
<b>Мінімум</b>	<b>-2,70900000</b>
Максимум	-0,17400000
Сума	-1092,83600000
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,17400000
Найменший(1)	-2,70900000

Таблиця 2.5 – Описова статистика вертикального пласта заповненого  
повітрям

<i>Вертикальний пласт, заповнений водою</i>	
Середнє	-0,30869215
Стандартна похибка	0,00476524
Медіана	-0,22900000
Мода	-0,10400000
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,21316108</b>
Дисперсія вибірки	0,04543764
Екссес	1,64459016
Асиметричність	-1,38999502
Інтервал	1,43300000
<b>Мінімум</b>	<b>-1,53100000</b>
Максимум	-0,09800000
Сума	-617,69300000
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,09800000
Найменший(1)	-1,53100000

Таблиця 2.6 – Описова статистика вертикального пласта заповненого водою

<i>Горизонтальний пласт+вертикальний пласт, заповнені повітрям</i>	
Середнє	-0,54632923
Стандартна похибка	0,00843153
Медіана	-0,40419060
Мода	-1,14722900
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,37716366</b>
Дисперсія вибірки	0,14225242
Екссес	1,64428448
Асиметричність	-1,38986094
Інтервал	2,53510500
<b>Мінімум</b>	<b>-2,70922750</b>
Максимум	-0,17412250
Сума	-1093,20479730
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,17412250
Найменший(1)	-2,70922750

Таблиця 2.7 – Описова статистика горизонтального та вертикального пласта, заповнених повітрям

<i>Горизонтальний пласт+вертикальний пласт, заповнені водою</i>	
Середнє	-0,30879633
Стандартна похибка	0,00476560
Медіана	-0,22910500
Мода	-0,64912950
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,21317727</b>
Дисперсія вибірки	0,04544455
Ексцес	1,64401886
Асиметричність	-1,38983462
Інтервал	1,43305937
<b>Мінімум</b>	<b>-1,53112860</b>
Максимум	-0,09806923
Сума	-617,90145154
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,09806923
Найменший(1)	-1,53112860

Таблиця 2.8 – Описова статистика горизонтального та вертикального пласта, заповнених водою

<i>Вертикальний циліндр, заповнений повітрям</i>	
Середнє	-0,02573463
Стандартна похибка	0,00565148
Медіана	-0,00341400
Мода	-0,01100000
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,25280520</b>
Дисперсія вибірки	0,06391047
Ексцес	1148,50130993
Асиметричність	-31,67101384
Інтервал	9,76514940
<b>Мінімум</b>	<b>-9,76600000</b>
Максимум	-0,00085060
Сума	-51,49499530
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00085060
Найменший(1)	-9,76600000

Таблиця 2.9 – Описова статистика вертикального циліндра заповненого повітрям

<i>Вертикальний циліндр, заповнений водою</i>	
Середнє	-0,01453942
Стандартна похибка	0,00319443
Медіана	-0,00193000
Мода	-0,01600000
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,14289508</b>
Дисперсія вибірки	0,02041901
Екссес	1148,44450254
Асиметричність	-31,67072473
Інтервал	5,51951920
<b>Мінімум</b>	<b>-5,52000000</b>
Максимум	-0,00048080
Сума	-29,09338040
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00048080
Найменший(1)	-5,52000000

Таблиця 2.10 – Описова статистика вертикального циліндра заповненого водою

<i>Горизонтальний пласт + вертикальний циліндр, заповнені повітрям</i>	
Середнє	-0,02591894
Стандартна похибка	0,00565157
Медіана	-0,00360370
Мода	-0,02922910
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,25280921</b>
Дисперсія вибірки	0,06391249
Екссес	1148,45000520
Асиметричність	-31,67001687
Інтервал	9,76525440
<b>Мінімум</b>	<b>-9,76622750</b>
Максимум	-0,00097310
Сума	-51,86379260
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00097310
Найменший(1)	-9,76622750

Таблиця 2.11 – Описова статистика горизонтального пласта та вертикального циліндра, заповнених повітрям

<i>Горизонтальний пласт + вертикальний циліндр, заповнені водою</i>	
Середнє	-0,01464359
Стандартна похибка	0,00319448
Медіана	-0,00203680
Мода	-0,01612950
<b>Стандартне відхилення</b>	<b>0,14289735</b>
Дисперсія вибірки	0,02041965
Екссес	1148,39325590
Асиметричність	-31,66972883
Інтервал	5,51957857
<b>Мінімум</b>	<b>-5,52012860</b>
Максимум	-0,00055003
Сума	-29,30183194
Рахунок	2001,00000000
Найбільший(1)	-0,00055003
Найменший(1)	-5,52012860

Таблиця 2.12 – Описова статистика горизонтального пласта та вертикального циліндра, заповнених водою

З метою узагальнення результатів чисельного моделювання та проведення якісного порівняльного аналізу гравітаційних ефектів від різних типів гірничих виробок було сформовано аналітичну таблицю, яка об'єднує дані, отримані за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та комп'ютерної системи Mathcad. У дослідженні були розглянуті декілька варіантів геометричних моделей: горизонтальний пласт, вертикальний пласт і вертикальний циліндр, які імітують реальні конфігурації шахтних виробок.

Для кожного з випадків було проаналізовано ключові параметри: середньоквадратичне відхилення та максимальну амплітуду гравітаційної аномалії. Ці показники дозволяють кількісно оцінити інтенсивність гравітаційного ефекту, ступінь його локалізації та залежність від фізичних властивостей заповнювача. Таблиця 2.13 подає узагальнені характеристики аномалій, зокрема середньоквадратичні відхилення та максимальні амплітуди, для кожного з варіантів моделювання.

Таблиця 2.13 – Порівняння характеристика аномального гравітаційного ефекту при насиченні горизонтальної та вертикальної виробки водою та повітрям з використання спеціалізованої програми та комп'ютерної системи Mathcad

	Результати, отримані в роботі				Результати, отримані при використанні СПЗ			
	Вода		Повітря		Вода		Повітря	
	Середнє відхилення	Максимальна амплітуда	Середнє відхилення	Максимальна амплітуда	Середнє відхилення	Максимальна амплітуда	Середнє відхилення	Максимальна амплітуда
Горизонтальний пласт	0.0000192 мГл	0.000129 мГл	0.000034 мГл	0.00022 мГл	0.004 мГл	0.13 мГл	0.13 мГл	0.39 мГл
Вертикальний пласт+горизонтальний пласт	0.213 мГл	1.531 мГл	0.377 мГл	2.709 мГл	0.239 мГл		0.398 мГл	2.141 мГл
Вертикальний циліндр+горизонтальний пласт	0.142 мГл	5.520 мГл	0.252 мГл	9.766 мГл				

## 2.4 Результати моделювання

У результаті розрахунку прямих задач гравірозвідки для випадку заповнення виробленого простору спочатку повітрям а потім водою, отримані гравітаційні поля та розраховані різницеві криві.

Результати розрахунків показали, що для моделей, які не містять вертикальних гірничих виробок величина середньоквадратичного відхилення між гравітаційними полями становить 0,004 мГл при заповненні очисних гірничих виробок водою і 0,13 мГл при заповненні їх повітрям. Максимальні амплітуди відхилень відповідно становлять 0,13 мГл і 0,39 мГл.

Для моделей, які включають вертикальні стовбури максимальна амплітуда відхилення між розрахованими полями сягає значення 2,141 мГл. Значення середньоквадратичного відхилення - 0,239 мГл при заповненні очисних та вертикальних виробок водою і 0,398 мГл при заповненні останніх повітрям.

У випадку, при моделюванні горизонтального і вертикального пласта, значення стандартного відхилення становить 0,213 мГл при заповненні системи водою та 0,377 мГл при заповненні повітрям. Максимальні амплітуди гравітаційних відхилень для цих моделей становлять 1,531 мГл та 2,709 мГл відповідно.

У результаті розрахунку прямих задач гравірозвідки в середовищі Mathcad для випадку, коли гірничу виробку апроксимовано вертикальним циліндром, були отримані гравітаційні поля для моделей із заповненням виробленого простору спочатку водою, а потім повітрям.

Результати обчислень показали, що при моделюванні лише горизонтальної виробки (горизонтального пласта), середньоквадратичне відхилення між відповідними гравітаційними полями становить 0,0000192 мГл у випадку заповнення водою та 0,000034 мГл — у випадку заповнення повітрям. Максимальні амплітуди відхилень відповідно досягають 0,000129 мГл і 0,00022 мГл.

У разі, коли до моделі було включено як горизонтальний пласт, так і вертикальний циліндр, значення стандартного відхилення становить 0,142 мГл при заповненні системи водою та 0,252 мГл при заповненні повітрям. Максимальні амплітуди гравітаційних відхилень для цих моделей становлять 5,520 мГл та 9,766 мГл відповідно.

Порівняльні характеристики, отримані в результаті розрахунків, підтверджують, що апроксимація гірничих виробок у вигляді вертикального циліндра у середовищі Mathcad забезпечує вищі значення амплітуд аномалій, ніж у випадку використання спрощеної геометрії (наприклад, вертикального пласта). Це свідчить про те, що точність геометричної моделі суттєво впливає на результати гравіметричних розрахунків, особливо коли йдеться про локальні аномалії, пов'язані з техногенними структурами.

Зіставлення результатів, одержаних у Mathcad, із даними, отриманими в спеціалізованому програмному забезпеченні, дозволяє констатувати як збіжність основних тенденцій у розподілі аномальних значень, так і відмінності в деталізації полів. У Mathcad забезпечується швидкий розрахунок для моделей із простими геометричними формами, що робить його ефективним засобом первинного аналізу. Водночас, використання програм професійного класу забезпечує кращу адаптацію до складних багат шарових моделей із неоднорідностями, що значно підвищує точність інтерпретації.

Таким чином, обидва підходи мають свої переваги: спеціалізоване програмне забезпечення забезпечує високий рівень моделювання складних геоструктур, а Mathcad надає можливість оперативного аналізу, що є особливо зручним у науково-освітньому середовищі. Комплексне використання обох інструментів дозволяє максимально ефективно реалізовувати завдання як прикладного, так і дослідницького характеру.

Варто також зазначити, що розрахунки у Mathcad дозволяють легко модифікувати вихідні параметри моделі — геометричні розміри, глибину залягання, щільність середовища, — і миттєво оцінити вплив цих змін на кінцеві результати. Така гнучкість особливо корисна під час формулювання

гіпотез, проведення серії сценарних розрахунків або виконання лабораторних робіт. Програма також має інтегровані засоби візуалізації даних, що суттєво полегшує інтерпретацію результатів та їх подальше представлення у графічній формі.

Щодо спеціалізованих гравіметричних пакетів, окрім високої точності й широких можливостей моделювання, вони забезпечують більш повну автоматизацію побудови складних моделей, підтримку великої кількості вхідних геофізичних параметрів і інтеграцію з іншими геологічними та геофізичними системами. Це робить такі інструменти надзвичайно потужними в умовах складного геологічного середовища, однак менш зручними для швидкого аналізу або освітніх завдань.

З урахуванням цього, можна зробити висновок, що вибір програмного середовища для розрахунків гравітаційних ефектів повинен визначатися не лише складністю поставленого завдання, але й доступністю інструменту, рівнем підготовки користувача, необхідною швидкістю обчислень та кінцевою метою аналізу — попереднє оцінювання, навчальна демонстрація чи детальне геофізичне моделювання.

## ВИСНОВОК

При плануванні та проведенні гравірознавчих робіт на ділянках де розташовані діючі або закриті шахти, особлива увага приділяється впливу шахтних виробок на регіональні гравітаційні аномалії. Виробки змінюють густинну структуру гірських порід, що створює локальні аномалії, які необхідно враховувати під час розв'язання задач гравірознавчих. Техногенні порушення, такі як осідання ґрунту, затоплення виробок або зміна густини через заповнення пустот, є додатковими чинниками, які ускладнюють інтерпретацію даних.

У рамках даного дослідження було проведено розрахунки аномальних гравітаційних ефектів, які викликані шахтними гірничими виробками. Основні результати роботи полягають у наступному:

### 1. Аналіз існуючих методик

Було систематизовано і проаналізовано сучасні методи розрахунку гравітаційних аномалій, викликаних підземними структурами. Встановлено, що аналітичні методи забезпечують високу точність для простих геометричних моделей, тоді як чисельні підходи дозволяють враховувати складні форми шахтних виробок і неоднорідності густини.

### 2. Геометричне моделювання шахтних виробок

Для моделювання шахтних виробок запропоновано використання геометричних моделей елементарних тіл: сфер, циліндрів, пластів і призм. Було визначено критерії вибору відповідної моделі залежно від форми і розмірів виробок, що дозволяє адаптувати методик до конкретних умов.

### 3. Оцінка впливу виробок на гравітаційне поле

Досліджено, що заміщення порід шахтними порожнинами суттєво змінює локальне гравітаційне поле, створюючи специфічні аномалії, які необхідно враховувати при інтерпретації даних гравірознавчих.

Встановлено, що при проведенні високоточних гравіметричних досліджень масштабу 1:10000, який застосовується при нафтогазопозукових роботах величина повної похибки інтерполяції складає 0,07-0,15 мГл, звідки можна

зробити висновок, що затоплені гірничі виробки шахт не будуть фіксуватися в спостереженому гравітаційному полі.

Діючі вугільні шахти не створюватимуть перешкод, якщо дослідження проводити на відстані 460 і більше метрів від шахтних стовбурів.

Результати дослідження можуть бути використані для корекції даних гравірозвідки в регіонах із розвинутою гірничодобувною інфраструктурою. Це дозволить підвищити точність оцінки глибинних структур і мінімізувати вплив техногенних факторів на інтерпретацію гравітаційних даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Анікеєв, С. Г. Гравірознавство і магнітознавство [Текст] : навч. посіб. / С. Г. Анікеєв, В. П. Степанюк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2008. – 242 с. – ISBN 966-7327-91-4.
2. Основи геофізики (Методи розвідувальної геофізики). [Текст] : підручник / М. І. Толс-той, А. П. Гожик, М. В. Рева [et al.]. – К. : ВПЦ "Київський університет", 2005. – 416 с.
3. Blakely, R.J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
4. Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
5. Li, Y., & Oldenburg, D.W. (1998). "3D inversion of gravity data." *Geophysics*, 63(1), 109-119.
6. Петровський О.П. Автоматизована система кількісної комплексної інтерпретації геофізичних даних GCIS як основа технології інтегральної інтерпретації комплексу геолого–геофізичної інформації для пошуків нафти і газу / О. П. Петровський, О. І. Кобрунов, Н. С. Ганженко, В. М. Суятінов // *Геоінформатика*. – 2003. – №2. – С. 25–34.
7. Nabighian, M.N., et al. (2005). "The historical development of the gravity method in exploration." *Geophysics*, 70(6), 63ND-89ND.
8. Hinze, W.J., Von Frese, R.R.B., & Saad, A.H. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
9. Hammer, S. (1939). "Terrain corrections for gravimeter stations." *Geophysics*, 4(3), 184-194.
10. LaFehr, T.R. (1991). "An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction." *Geophysics*, 56(8), 1179-1184.
11. Cordell, L., & Henderson, R.G. (1968). "Iteration method for resistivity and gravity data interpretation." *Geophysics*, 33(4), 596-601.

12. Talwani, M., & Heirtzler, J.R. (1964). "Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional structures of arbitrary shape." *Geophysics*, 29(2), 241-257
13. Li, X., & Götze, H.-J. (2001). "Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics." *Geophysics*, 66(6), 1660-1668.
14. Barnett, C.T., & Guy, M.W. (2006). "The gravity field of the sedimentary basin." *Geophysical Prospecting*, 54(2), 233-245.
15. Parker, R.L. (1973). "The rapid calculation of potential anomalies." *Geophysical Journal International*, 31(4), 447-455.
16. Генезис і акумуляція метану палеозойських відкладів Львівсько-Волинського басейну : звіт про науково-дослідну роботу [Бик С.І та ін]. Львів: 2011.
17. Габльовський Б.Б. Вплив підземних гірничих виробок на гравітаційне поле при вирішенні нафтогазопошукових задач / Б.Б. Габльовський, О.П. Петровський, Т.О. Федченко, В.М. Суятінов // Нафтогазова геофізика – нетрадиційні ресурси: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Івано-Франківськ: Імста, 2013. – С.53 – 57.

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: "Розрахунок аномальний гравітаційних ефектів від шахтних гірничих виробок на основі рішення прямих задач гравірозвідки для елементарних тіл".

Пояснювальна записка до балакалаврської роботи містить 53 сторінок, 22 рисунки, 13 таблиць.

Графічний матеріал (презентація містить 14 слайдів).

Лідія ТУРЯНСЬКА

---

дата

підпис