

УДК 550.831.23+550.83.001.5+550.83:528.94+550.83.053:681.3
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.04>

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ukr.net

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

ПЕТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРІД ТОМАКІВСЬКОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО МАКСИМУМУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Вступ. У статті викладено результати вивчення фондових та архівних матеріалів геологічних організацій щодо фізичних властивостей гірських порід у межах Томаківського гравітаційного максимуму (ТГМ), який розташований у центральній частині Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Результати попередніх геолого-геофізичних досліджень, отримані на початку 90-х років минулого століття, не дали відповіді на його природу. Тому завданням дослідження було проаналізувати матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень по їх поверхні та вздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м. Метою також було вивчення особливостей геологічної будови самого стовбура Томаківської глибокої свердловини.

Методи. В основі досліджень були фондові та архівні матеріали геологічних організацій "Південукргеологія" та "Дніпрогеофізика" щодо фізичних властивостей порід, з яких складається докембрійська поверхня та розріз Томаківського гравітаційного максимуму. Матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень уздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м було ретельно зібрано, проаналізовано та переосмислено з позицій сучасних гіпотез. На основі статистичної обробки магнітно-щільнісних властивостей об'єднано в єдиний петрофізичний банк даних.

Результати. Вперше отримано узгоджену магнітно-щільнісну класифікацію порід Томаківського гравітаційного максимуму і бортів зеленокам'яних структур, яка охоплює понад 30 породних різновидів. Існуюча петрофізична латеральна неоднорідність структури та її зміни у верхній частині земної кори пояснюються збільшенням процентного складу в розрізі її найщільніших компонентів, а не впливом градієнта щільності з глибиною.

Властивості магнетитовмісних різновидів біотитових мігматитів, апліт-пегматоїдних гранітів та біотитових плагіомігматитів значно знижені порівняно з даними площинного відбору проб. Ця особливість зумовлена збідненням магнетиту в цих різновидах у межах локальних гравітаційних максимумів. Відзначено два інтервали потужністю перших сотень метрів зі збільшеними значеннями щільності та три інтервали з високими значеннями намагніченості. Від глибини 1700–1800 м і до забою цієї свердловини відзначається закономірне збільшення щільності та намагніченості кристалічних порід. У магнітному відношенні вздовж стовбура свердловини виділяються три чітко окреслені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожен на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м та 1400–1500 м, що зумовлено переважанням магнітних різновидів біотитових гранітів, біотитових плагіомігматитів та амфіболітів.

Висновки. Отримані результати, що узагальнюють значну кількість фізичних властивостей зразків, дають змогу провести детальніше картографування докембрійської поверхні за допомогою гравімагнітних полів під час виконання геологорозвідувальних робіт у пошуках корисних копалин. Результати вивчення фізичних властивостей геологічного розрізу до глибини 2000 м дозволяють по-новому розглянути особливості глибинної природи Томаківського гравітаційного максимуму при моделюванні його структури за допомогою гравітаційних та магнітних полів.

Ключові слова: Український щит, гравітаційне поле, Томаківський гравітаційний максимум, петрофізичні властивості, структурно-тектонічна будова.

Вступ

Публікації авторів (Ентин і др., 2015; Свистун, Антонов, & Пігулевський, 2020; Svistun, & Pigulevskiy, 2021) про можливі варіанти використання гравітаційного поля України при вивченні геологічної будови земної кори та пошуків покладів корисних копалин підштовхнули автора до подальшого розвитку цієї теми. Територія України покрита різномасштабними гравітаційними зйомками, які показують особливості різномірної будови земної кори, відображеної у гравітаційному полі. Але інтерпретація аномалієвірних об'єктів потребує більш повної інформації про властивості гірських порід залежно від глибини їх залягання.

Одним з неординарних об'єктів у межах УЩ є Томаківський гравітаційний максимум (ТГМ), представлений регіональним підвищенням гравітаційного поля з амплітудою в епіцентрі 50–55 мГал (Ентин і др., 2015; Свистун, Антонов, & Пігулевський, 2020; Svistun, & Pigulevskiy, 2021) та розташований у межах центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку (СПМ) Українського щита (УЩ) (Берзенин і др., 1988; Пігулевський, 2012; Тектонічна карта..., 2007). Просторово він тягнеться до крутого повороту на південь річки Дніпро між

містами Дніпро і Запоріжжя. ТГМ часто ототожнюється із Запорізьким антиклінальним підняттям (Каляев та ін., 1972) або з Томаківською антиформою II порядку (Берзенин і др., 1988; Переверзев і др., 1992). Його площа по ізолінії 40 мГал сягає 3550 км² при загальному периметрі ізолінії 283 км і витягнута в північно-північно-східному напрямку (рис. 1). Основний максимум розміщується на південний захід від м. Запоріжжя та північніше Каховського водосховища з епіцентром у північно-східній частині структури, де його інтенсивність сягає 53,5 мГал з площею по ізолінії 50 мГал близько 200 км².

За своєю інтенсивністю ТГМ зіставляється з аномаліями над Чортомлицькою, Конкською і Сурською зеленокам'яними структурами (ЗКС), однак характеризується значно нижчими градієнтами, що може свідчити про велику глибину залягання аномалієвірних мас. Просторово ТГМ доповнює центральну частину дугоподібних елементів, які складаються з ланцюжка субмеридіонально орієнтованих гравітаційних аномалій. Із заходу від ТГМ – це Верхівцевсько-Софіївсько-Чортомлицька смуга, а зі сходу – Дерезувацько-Конксько-Білозерська. Центральна смуга включає Сурську аномалію і ТГМ (рис. 1, 2).

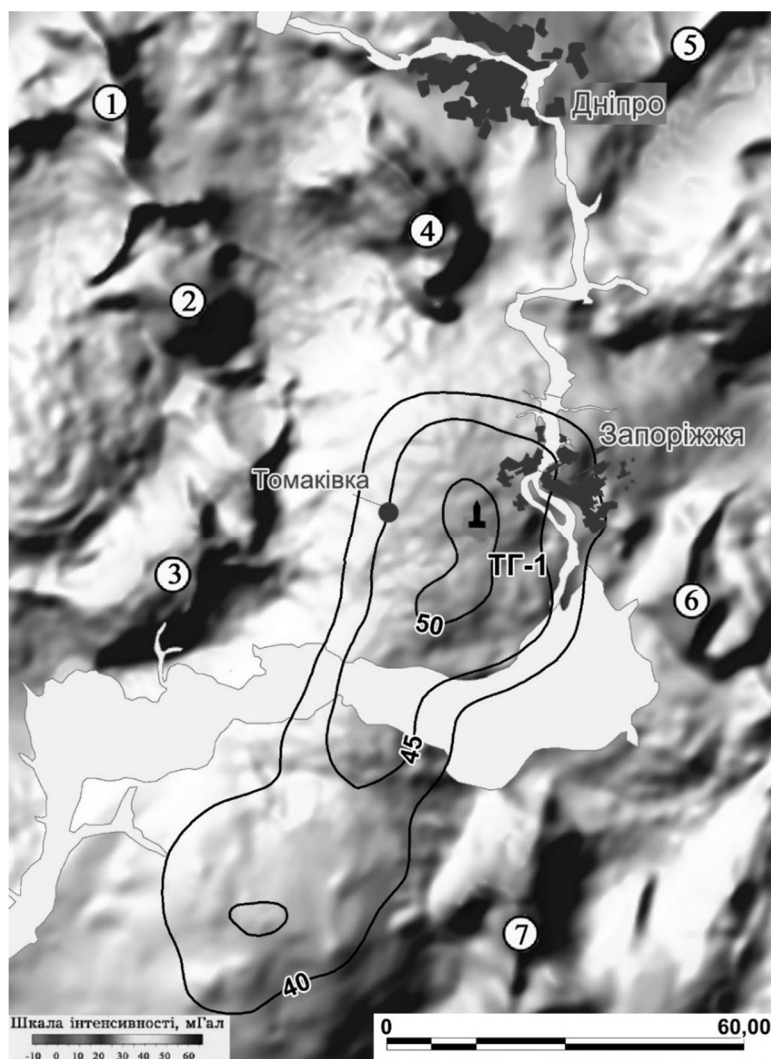


Рис. 1. 3D-зображення аномального гравітаційного поля Δg_a (в редукції Буге=2,3 г/см³) центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Тектонічні елементи. Томаківська антиформа II порядку (Томаківський гравітаційний максимум). Зеленокам'яні структури: 1 – Верхівцевська, 2 – Софіївська, 3 – Чортомлицька, 4 – Сурська, 5 – Дерезувацька, 6 – Конкська, 7 – Білозерська. ТГ-1 – Томаківська глибока свердловина

Для вивчення можливого зв'язку регіонального ТГМ з латеральними змінами щільності на рівні ерозійного зрізу порід кристалічного фундаменту, попередники (Переверзев и др., 1992) визначили середні значення щільності в межах елементарного осередку $\sim 40 \text{ км}^2$ у смузі завширшки 10 км із центром у місці закладення свердловини. Значення щільності розраховувались з використанням свердловин, які потрапили в межі елементарного осередку, і загалом по осередку. В результаті обробки побудованих гістограм розподілу середньої щільності і їх зіставлення з графіком зміни Δg_a було отримано інформацію, яка показала відсутність латеральних змін (зростання) щільності вивченої бурінням частини розрізу від флангів ТГМ до його центру.

Для оцінки альтернативних варіантів пояснення природи ТГМ попередники вивчили можливий його зв'язок з такими факторами:

- ефектом підйому поверхні кристалічного фундаменту на вододілі річок Томаківка і Дніпро;
- не розкритою сучасним ерозійним зрізом зеленокам'яною структурою;
- інтегрованим впливом щільнісних неоднорідностей, розкритих у верхній частині розрізу свердловиною ТГ-1;

- загальним підняттям з подальшою ерозією всього блоку порід, включаючи ТГМ, за наявності вертикального градієнта щільності порядку $0,01 \text{ г/см}^3/\text{км}$ відповідно до уявлень Голіздри (1988), Тяпкіна (1998).

За результатами досліджень в 70–90 рр. минулого століття було запропоновано кілька гіпотез інтерпретації природи аномалії. Каляєв та ін. (1972) трактували аномалію як антиклінальне підняття з поетапним збільшенням частки основних порід, метаморфізованих гранулітовою фацією, із глибиною. З. О. Крутіховська (1971), внаслідок розміщення Томаківської аномалії на одній вісі із Сурською ЗКС і утворення поясу, паралельного Конксько-Білозерському і Верхівцевсько-Чортомлицькому, зробила припущення, що аномалія спричинена основними породами конксько-верхівцевської серії, не розкритих ерозією. На початку 90-х рр. минулого століття в результаті обробки геологічних і геофізичних даних (включаючи і глибинне сейсмосондування), завірки аномалії бурінням глибокої свердловини ТГ-1 (Литосфера..., 1988; Переверзев и др., 1992), було зроблено припущення, що аномалія викликана антиклінальним, а вірніше, валоподібним підняттям кристалічних порід із збільшенням частки

амфіболових мігматитів, основних порід славгородської товщі аульської серії із глибиною. Водночас відзначалось також збільшення ступеня метаморфізму в цьому напрямку. Особливість тектоніки структури Томаківської аномалії, на відміну від вищезазначених, полягає в тому, що на поверхні будова антикліналі проявляється слабо, але її масштаб і контрастність із глибиною збільшуються. Тектонічний процес, який привів до утворення антикліналі, характеризується вертикальним рухом знизу вгору з поступовим затуханням результатів цього руху до поверхні. При цьому

простежується складна будова антиклінального підняття – крім центрального підняття, спостерігаються антиклінальні підняття другого порядку, концентрично облямовуючи центральну частину. Згідно з геофізичними даними, західне крило має кути падіння $30\text{--}35^\circ$, а східне – $10\text{--}20^\circ$. Результати буріння глибокої свердловини визначили кути падіння від $15\text{--}20^\circ$ до $35\text{--}40^\circ$ на заборі. Спостережені відхилення нахилу смугастості від указаних границь пов'язані з утворенням складок плину в розігрітому матеріалі кори, коли він був у стані підвищеної пластичності (Переверзев и др., 1992).

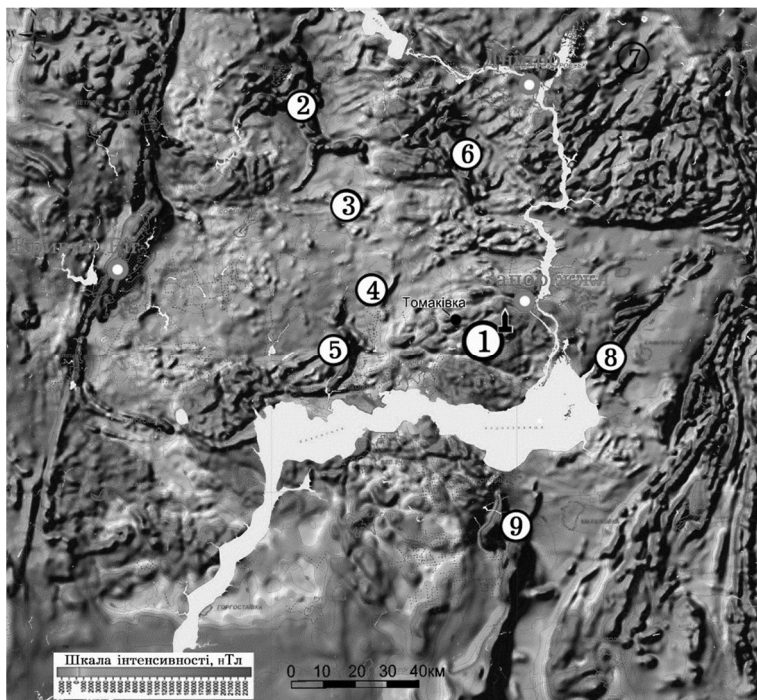


Рис. 2. 3D-зображення аномального магнітного поля ΔZ_a , ΔT_a Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита.

Тектонічні елементи. Томаківська антиформа II порядку (Томаківський гравітаційний максимум) – 1. Зеленокам'яні структури: 2 – Верхівцевська, 3 – Софіївська, 4 – Криничувацька, 5 – Чортомлицька, 6 – Сурська, 7 – Дерезувацька, 8 – Конкська, 9 – Білозерська

Також свої варіанти будови земної кори Середньопридніпровського мегаблоку (Придніпровського палеосклепіння) Українського щита були запропоновані Ю. П. Оровецьким (Оровецкий и др., 1997), А. Г. Насадом та іншими, які пов'язували регіональну аномалію з підйомом поверхні Мохоровичича (Насад и др., 1997; Насад, Коваленко, & Пигулевский, 2000). В. І. Старостенко, П. Я. Купрієнко, І. Б. Макаренко досліджували окремі особливості складу земної кори та будови поверхні Мохоровичича СПМ за результатами тривимірного моделювання гравітаційного поля території України (Купрієнко и др., 2007а; 2007б; Старостенко и др., 2007). П. Г. Пігулевський у своїх дослідженнях запропонував модель будови літосфери за геоелектричними даними до глибини 200 км (Пігулевский, 2012).

Для вивчення природи ТГМ на межі 80 та 90-х рр. минулого століття було пробурено глибоку свердловину ТГ-1, яка не змогла дати однозначну відповідь про його геологічну природу (Переверзев и др., 1992). Виконані при цьому комплексні геолого-геофізичні дослідження в свердловині також не змогли пояснити феномен ТГМ за рахунок щільнісної диференціації порід верхньої 2-кілометрової частини докембрійських утворень.

За геохронологічними даними вік геологічної структури встановлюється як мезоархейський (Артеменко, 1995; Орса, 1989; Щербаков и др., 1984; Єсипчук та ін., 2002). На користь цього свідчить розташування аномалії, яка є продовженням Сурської аномалії і складає пояс, паралельний сусіднім поясам, утвореним зеленокам'яними структурами: із заходу Верхівцевсько-Чортомлицькому, а зі сходу – Конксько-Білозерському. ЗКС складені породами конкської та білозерської серій мезоархейського віку, тому час формування поясів встановлюється також як мезоархейський. Підтвердженням цього служить належність гранітів мокромосковського та токівського комплексів до Томаківської аномалії, які, як відомо, також мають мезоархейський вік.

Диз'юнктивна тектоніка в районі Томаківського максимуму набула широкого розвитку. На відміну від плікативних структур, встановити вік того чи іншого розлому, особливо в умовах закритого району, надзвичайно складно, а частіше за все, неможливо. Разом з тим, використовуючи системний аналіз, можна зробити припущення про те, що система субширотних і ортогональних до неї меридіональних порушень передбачувано палеоархейського віку, а діагональні розломи належать до мезоархейських (Tiapkin, Pihulevskyi, & Dovbnich, 2017). Однак

треба брати до уваги довготривалий характер головних розломів і частково більш дрібних порядків. Палеоархейські розломи зазнавали оновлення протягом тривалого часу. Передусім це стосується Південночортомлицького та Новопавлівського розломів.

За ступенем значущості і масштабом розривні порушення можна розділити на розломи головні: Девладівський, Хортицький, Новопавлівський, Південночортомлицький, Конкський і другорядні, з яких найбільші: Дмитрівський, Михайлівський, Жмеринський, Борисівський, Кисличеватський і Тарасівський (Коваленко і др., 1986; Переверзев і др., 1992).

У магнітному полі Томаківської площі виділяються протилежні за будовою дві області – в цілому підвищене до величин 100–150 нТл мозаїчне поле, яке збігається із загальним контуром ТГМ (рис. 2) та відповідає магнітним варіаціям порід, представлених переважно гранітами біотитовими і плагіогранітами. Зниженим мозаїчним полям, що їх оконтурюють, інтенсивністю від -50 до -100 нТл, відповідають немагнітні породи переважно гранітного складу. У межах останніх виділяється еліпсоподібна аномалія найбільш зниженого спокійного магнітного поля, з якою збігається субширотний локальний гравітаційний мінімум. На підставі даних буріння (Переверзев і др., 1992) ця комплексна аномалія інтерпретується як ядро Новодніпровської антикліналі. Масив поділяє дугоподібні елементи фізичних полів та відділяє ТГМ від Сурської структури на півночі. У магнітному полі це зазвичай вузькі протяжні максимуми інтенсивністю у перші сотні нТл, які відповідають переважно тілам гнейсів, мігматитів, сланців і, у невеликому обсязі, магнітним різновидам амфіболітів. Одним з найбільш яскравих елементів магнітного поля є розташована в центральній частині ТГМ вузька протяжна зона мінімумів За північно-західного простягання (рис. 2), що інтерпретується як прояв Новопавлівського розлому, виконаного немагнітними різновидами плагіогранітів і гранітів апліто-пегматоїдних. На південь від цього розлому серією дайкоподібних тіл широтного простягання, переважно амфіболітового та гнейсового складу, простежується Південночортомлицький розлом.

На північному сході ТГМ підвищене магнітне поле відповідає масивам магнітних різновидів біотитових гранітів і плагіогранітів, розвинених у його центральних частинах, які обмежуються чітко проявленим у магнітному полі і незначним у гравітаційному Хортицьким розломом північно-західного простягання. Далі на північний захід максимуму зона розлому контролюється зливом закінчень локальних магнітних максимумів, що відповідають переважно вузьким тілам гнейсів і мігматитів (іноді амфіболітового складу). Максимуми магнітних аномалій у північній частині відповідають зоні Девладівського розлому. Аномалії є субширотними, досить протяжними і вузькими, різного знаку. Спостерігається зона Девладівського розлому, яка простежується до Криворізько-Кременчуцької шовної зони (Pihulevskiy et al., 2023). Його центральну частину займає ізометричне підвищення магнітного поля інтенсивністю 400 нТл і вище, що відповідає масиву магнітних різновидів гранітів і мігматитів біотитових. Серед цих порід встановлено прошарки амфіболітів, які пояснюють зафіксований локальний протяжний максимум гравітаційного поля північно-східного простягання, що просторово збігається з позитивною магнітною аномалією (рис. 1, 2). У північній частині максимуму фіксується ізометричне підвищення гравітаційного поля, яке, ймовірно, відповідає масиву відносно щільних біотитових плагіомігматитів та біотитових гнейсів.

У східній частині ТГМ серед масиву біотитових плагіомігматитів з останцями гнейсів амфібол-біотитових виділяються дві невеликі ізометричні позитивні аномалії магнітного поля. В межах однієї з них свердловиною розкрито діорити, що дає підстави інтерпретувати ці аномалії як виходи невеликих тіл діоритів. У районі с. Томаківки за матеріалами зйомки масштабу 1:50000 виділяється характерна аномалія магнітного поля еліпсоподібної форми субширотного простягання. Судячи з кільцеподібного поля розглянутої площі, аномалієвірний об'єкт являє собою синклінальну структуру, крила якої складені специфічним комплексом порід (перешаровуванням залізистих кварцитів, кристалосланців амфібол-магнетит-кварцових, амфіболітів). Для західного крила структури характерні пластові подібні консонантні тіла ультраосновних порід (перидотитів та актинолітитів за ними).

У цілому слід відзначити значно менший розвиток ультраосновних порід порівняно з очікуванням.

Виконана авторами (Переверзев і др., 1992) кількісна перевірка різних гіпотез будови максимуму засвідчила, що ні одна із цих версій не пояснює спостережене поле.

Методи

Основою досліджень були фондові та архівні матеріали геологічних організацій "Південукргеологія" та "Дніпрогеофізика" про фізичні властивості порід, що складають докембрійську поверхню та розріз Томаківського гравітаційного максимуму. Незважаючи на те, що каталоги у виробничих звітах містять різномірну інформацію, яка стосується макроскопічного опису зразків порід, все ж таки вони дали змогу зберегти значну кількість первинних даних і полегшили роботу з пошуку, збирання та узагальнення матеріалів визначень фізичних властивостей гірських порід.

Матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень уздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м було ретельно зібрано та систематизовано з метою отримання додаткової інформації про особливості будови тектонічної одиниці. Для підвищення геологічної ефективності накопиченої інформації з переробки та додаткового аналізу результатів вимірювань фізичних властивостей було застосовано єдину для центральної частини Середньопридніпровського регіону методику обробки (Толстой та ін., 2003). Вона враховувала і методичні підходи, застосовані авторами в роботі (Пигулевский, & Свистун, 2014; Pihulevskiy et al., 2024; Pihulevskiy et al., 2025).

При обробці ставилися завдання: відобразити найбільш суттєві закономірності зміни фізичної характеристики порід різного генезису та складу; використовувати петрофізичну характеристику для з'ясування загальних або відмінних умов утворення, літогенезу, метаморфізму різних геологічних формацій для внесення коректив до існуючої схеми формаційного розчленування порід докембрію.

Аналіз наявних геологічних матеріалів для території ТГМ показав, що густина розташування пробурених свердловин та відслонень на площі практично скрізь відповідає масштабу геологічної зйомки 1:50000 (Організація та проведення..., 1999). Для отримання наявної картини петрофізичної диференціації геологічних утворень обробка виконувалась в два етапи. На першому етапі було виконано петрофізичну класифікацію порід, що передбачає виділення петрофізичних та петромагнітних груп порід з урахуванням закономірних зв'язків між фізичними властивостями, складом та текстурою порід, які відображають умови їх утворення, літогенезу та метаморфізму (Есипчук і др., 1993; Орса, 1989). На другому етапі вивчалися можливості відображення петрофізичної латеральної

неоднорідності геологічних утворень (Толстой та ін., 2003) для розуміння глибинної будови ТГМ (Pigulevskiy, & Stovas, 2022; Pigulevskiy, & Shumlianska, 2024; Shumlianska, & Pigulevskiy, 2024; Shumlianska et al, 2024).

Результати

Отримані середні значення щільності та намагніченості порід для різних комплексів дали змогу надалі виконати оцінку розвитку стратифікованих і нестратифікованих

утворень (Єсипчук та ін., 2004), а також підготувати основу для розуміння глибинної геологічної будови ТГМ.

З іншого боку, фактично існуючі межі коливань окремих різновидів порід призводять до суттєвого їх накладання і, таким чином, зростання неоднозначності інтерпретації. Взагалі, характер прояву у фізичних полях залежить від потужності та будови окремих тіл і масивів, складу навколишніх порід та варіацій речовинного складу, які приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні властивості докембрійських порід центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку (ТГМ з урахуванням бортів зеленокам'яних структур)

№ групи	Назва породи	Кількість визначень	Фізичні властивості	
			Щільність, $\sigma \times \text{г/см}^3$	Магнітна сприйнятливість, $\alpha \times 10^{-6} \text{Cl}$
1	Плагіограніти біотитові	192	2,70 2,62-2,80	16 0 - 522
2	Плагіограніт – порфіри (сурські)	26	2,71	18
3	Плагіомігматити біотитові	477	2,73	181
4	Плагіомігматити амфібол-біотитові	71	2,74 2,66-2,79	774 14-8486
5	Тоналіти біотитові	44	2,77	170
6	Граніти апліто-пегматоїдні	121	2,61 2,49-2,71	70 0-430
7	Граніти біотитові порфіроподібні (демуринські)	40	2,68 2,59-2,80	297 0-1616
8	Граніти біотитові (токівські)	309	2,68	85
9	Граніти біотитові (мокримосковські)	387	2,65	128
10	Мігматити двопольовошпатові	96	2,69	123
11	Метадіорити, метагабродіорити	42	2,82 2,61-2,95	75 7-2080
12	Діорити, діорити кварцові	36	2,82	75
13	Кварцові порфіри, альбітофіри, плагіопорфіри	21	2,72	60
14	Метаріоліти	54	2,67 2,61-2,94	100 60-1830
15	Метадацити	29	2,77 2,55-2,80	22 2-242
16	Метадолерити (криничуватські)	54	2,96 2,75-3,07	120 0-170
17	Діабази	26	2,92 2,78-3,04	829 62-6100
18	Метагабро, метагабродіабази	35	2,88 2,90-3,12	1032 1 - 8065
19	Туфолави та туфи основного складу	33	2,85 2,80-2,95	530 10-1330
20	Метаандезити	37	2,81	60
21	Тремолітити, плагіоклаз – тремолітові сланці	32	2,96	240
22	Сerpентиніти, сильно серпентинізовані ультраосновні породи	92	2,64 2,63-2,71	3950 180-6900
23	Актинолітити, плагіоклаз-актинолітові сланці	66	2,99 2,95-2,96	100 120-5300
24	Тальк-хлорит-карбонатні, тальк-карбонатні породи	53	2,87 2,89-2,92	415 395-5130
25	Амфіболіти конкської серії в рамі ЗКС	131	3,00 2,98-3,01	115 100-650
26	Амфіболіти аульської серії	189	2,97	100
27	Гнейси біотитові аульської серії	144	2,69	54
28	Гнейси амфібол-біотитові аульської серії	57	2,80	921
29	Сланці біотит-актиноліт-плагіоклазові	159	2,97	125
30	Гнейси гранат-біотитові	25	2,86	1020
31	Гнейси силіманіт-гранатові	19	2,77	680
32	Сланці амфіболові	47	2,97	85
33	Плагіоклаз-кварц-серіцитові сланці	73	2,74	60
34	Залістисті кварцити	71	3,25	63500
35	Кристалосланці кварц-магнетит-амфіболово-гранатовий, магнетитові	150	3,12 2,63-3,87	19797 20-101000
36	Кристалосланці плагіоклаз-амфіболові	14	3,03 2,90-3,17	74 0-149
37	Метапісковики	572	2,74	50

Загалом, з урахуванням приведених даних, було виділено такі групи порід:

Перша група – нещільні ($2,6 \div 2,7$ – тут та надалі значення щільності наведено в г/см^3), слабомагнітні ($10 \div 100$ – тут та надалі значення магнітної сприйнятливості наведено в од. $\times 4\pi \times 10^{-6}$ CI): плагіограніти біотитові (1 – тут та надалі номер відповідає табл. 1), граніти апліто-пегматоїдні (6), метаріоліти (14), метадацити (15).

Друга група – нещільні ($2,6 \div 2,7$), магнітні ($100-1\ 000$): плагіомігматити біотитові (7), граніти біотитові токівські (8), граніти біотитові мокромосковські (9), мігматити двопольовошпатові (1).

Третя група – нещільні ($2,6 \div 2,7$), високомагнітні ($100-10\ 000$): граніти біотитові порфіроподібні (демуринські) (7), серпентиніти (22).

Четверта група – середньої щільності ($2,7 \div 2,8$), слабомагнітні ($10-100$): плагіограніти-порфіри сурські (2), метадіорити (11), метагабродіорити (14), плагіоклаз-кварц-серіцитові сланці (33), метапісковики (37).

П'ята група – середньої щільності ($2,7 \div 2,8$), магнітні ($100-1\ 000$): тоналіти біотитові (15), плагіомігматити амфібол-біотитові (4), гнейси амфібол-біотитові аульської серії (28).

Шоста група – щільні ($2,8 \div 3,0$), слабомагнітні ($10-100$): діорити, діорити кварцові (12), туфолави та туфи основного та середнього складів (19), метаандезити (29), актинолітити, тремолітити (21,23), амфіболіти (25, 26), гнейси біотитові аульської серії (27), сланці біотит-актиноліт-плагіоклазові (28), кварцові порфіри, альбітофіри, плагіопорфіри (13).

Сьома група – щільні ($2,8 \div 3,0$), магнітні ($100-1\ 000$): метадолерити криничуватські (16), діабазы (17), тальк-хлорит-карбонатні, тальк-карбонатні породи (24), гнейси гранат-біотитові (30), силіманіт-гранатові (31).

Восьма група – найбільш високими значеннями фізичних параметрів характеризуються кристалосланці кварц-магнітит-амфіболово-гранатовий, магнетитові – 3,12, 49 797 (35) і залізисті кварцити – 3,25, 63 500 (34).

Дев'ята група – високощільні ($3,0 \div 3,1$), слабомагнітні ($10-100$): кристалосланці плагіоклаз-амфіболові, слабомагнітні (3,17; 85) – кристалосланці амфіболові (36).

До високощільних (3,01) і магнітних (532) віднесено метагабро, метагабродіабазы (18).

Окремо слід підкреслити існуючу різницю між демуринськими, токівськими і мокромосковськими біотитовими гранітами, з яких найменш щільними і магнітними є мокромосковські (2,65, 128), а найбільш щільні і магнітні – токівські (2,67, 958).

Всі щільності порід, які знайшли відображення в табл. 1, практично лежать в інтервалі $2,61-3,33 \text{ г/см}^3$. При цьому частину зразків відібрано з відслонень, зон розломів, а деякі різновиди порід (сланці кварц-кумінгтонітові, гнейси біотитові, метасоматити кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-амфіболові, катаклазити по гранітах і деякі інші) мають недостатню кількість визначень – від 3 до 15. З іншого боку, для всієї сукупності порід характерний практично безперервний спектр щільності у зазначеному вище інтервалі. Частина порід має емпіричні ряди розподілення щільності і магнітних властивостей, значно відмінних, відповідно, від нормального і логнормального законів. У табл. 1 їм відповідають породи із сильно відмінними від нуля коефіцієнтами асиметрії та ексцесу: гранітоїди, пегматити, апліто-пегматити, апліти, амфіболіти, сланці хлорит-актиноліт-тремолітові, кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-біотитові породи та ін. Тому інтервали зміни фізичних властивостей окремих різновидів порід часто перекривають один одного.

Все відзначене вище вказує на те, що класифікація порід по середніх (або модальних) значеннях щільності і магнітної сприйнятливості і виділення їх у групи має відносно умовний характер.

Для оцінки очікуваних значень нормального розподілу щільності було виконано t -тест Стюдента статистичної значущості різниці математичних очікувань двох вибірок та довірчого інтервалу різниці очікуваних значень. Виконано оцінку статистичної значущості відмінностей щільнісних властивостей структурно-речовинних комплексів для локальних максимумів та мінімумів гравітаційного поля, її результати наведено в табл. 2.

Аналіз побудованих гістограм розподілу щільності в локальних гравітаційних максимумах (3,1) та мінімумах (3,2) гравітаційного поля показав, що в перших переважають породи зі щільністю $2,7-2,8 \text{ г/см}^3$, а в других $2,6-2,7 \text{ г/см}^3$ (рис. 3). Такий розподіл значень в геологічному просторі і зумовлюють локальні коливання гравітаційного поля.

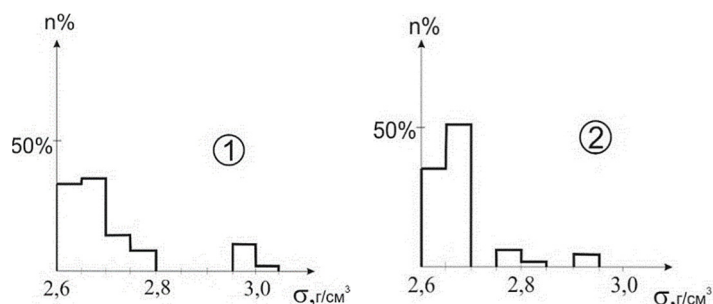


Рис. 3. Гістограми розподілу щільності в локальних гравітаційних максимумах (1) та мінімумах (2) гравітаційного поля

Щільнісні і магнітні властивості порід за розрізом ТГ-1. Аналіз даних з визначення фізичних властивостей по свердловині Томаківська глибока – 1 (табл. 3.1 та 3.2) показав:

- Групи і комплекси порід, розкриті свердловиною, загалом подібні вивченим по площі, а їх фізичні властивості дуже близькі. В основному щільнісні характеристики

більшості груп рівні або на $0,01-0,02$ вищі у зразків, розкритих свердловиною, порівняно з "площинним опробуванням", що є закономірним і пов'язано, ймовірно, із загальним ущільненням порід із глибиною.

Виянок становлять аномально низькі щільності, одержані по свердловині для гнейсів біотитових і високі – для піроксеніту. Найбільш вірогідним поясненням є мала представленість вибірки для цих типів (відповідно 2 і

18 зразків, табл. 4), разом з великими варіаціями щільнісних параметрів. Суперечливі і понижені значення щільності розкритих свердловиною плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових. Скоріш за все, це

пов'язано з різко підвищеною щільністю магнітних різновидів, що викликано, як це видно по збільшенню магнітної сприйнятливості, з підвищенням вмістом магнетиту в зразках, розкритих на площі.

Таблиця 2

Оцінка статистичної значущості відмінностей щільнісних властивостей структурно-речовинних комплексів для локальних максимумів та мінімумів гравітаційного поля

Назва породи	Параметри вибірок						Критерій Стюдента (таблична величина при 5 % рівні значущості 1,98)
	max			min			
	σ г/см ³	n	σ г/см ³	σ г/см ³	n	σ г/см ³	
Гнейс біотитовий	2,69	44	0,05	2,68	97	0,06	1,82
Гнейс біотит-амфіболовий, амфіболовий	2,79	11	0,10	2,79	25	0,10	0
Амфіболіт	2,98	35	0,10	2,94	32	0,14	1,33
Мігматит біотитовий	2,68	19	0,12	2,67	47	0,06	0,69
Плагіомігматит біотитовий	2,73	61	0,04	2,69	92	0,06	1,37
Плагіомігматит амфіболовий, амфібол-біотитовий	2,77	18	0,06	2,78	14	0,09	0,35
Граніт біотитовий немагнітний	2,65	71	0,06	2,64	150	0,05	0
Граніт біотитовий магнітний	2,68	16	0,02	2,69	66	0,02	1,75
Граніт апліто-пегматоїдний	2,63	42	0,02	2,60	66	0,04	1,72
Плагіограніт біотитовий	2,68	60	0,05	2,66	117	0,04	0
Плагіограніт біотитовий (магнетитовмісний)	2,71	11	0,03	2,69	30	0,02	1,02
Гнейс біотитовий (магнетито-вмісний)	2,80	9	0,02	2,72	19	0,06	0,17
Вибірка загалом Σ	2,70	397	0,06	2,68	829	0,05	5,75

• Пониженими порівняно з даними "площинного опробування" є магнітні властивості магнітних різновидів мігматитів біотитових – $\alpha_{\text{сер.}}$, відповідно, сягає 1258 і 389, гранітів апліто-пегматоїдних – відповідно 2619 і 314 і плагіогранітів біотитових магнетитовмісних – 1190 і 370.

• Більшість зразків свердловини ТГ-1 характеризуються незначними варіаціями $\sigma_{\text{сер.}}$ в межах 2,65–2,70 (табл. 3.1 та 3.2). При цьому різко підвищеними значеннями щільності відзначаються амфіболіти, плагіомігматити амфіболові, амфібол-біотитові, кристалосланці амфібол-біотитові, які утворюють малопотужні (перші метри) тіла із значеннями $\sigma_{\text{сер.}}$ до 3,0 г/см³ і більше). В найнижчій частині свердловини розріз представлений переважно плагіомігматитами біотитовими із середньою щільністю до 2,75, проте зразок із забоя (2000 м) має $\sigma = 2,88$.

Крім того, в інтервалах 200–500 і 1200–1600 м спостерігається незначні підвищення інтервальної щільності до 2,78–2,82 г/см³.

В магнітному відношенні по свердловині виділяються три чітко виражені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожний, на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м і 1400–1500 м, викликаних, відповідно, переважанням магнітних різновидів гранітів біотитових,

плагіомігматитів біотитових і амфіболітів ($\alpha_{\text{інт.}}$ до 3000). З глибин 1700–1800 м і до забою спостерігається закономірне зростання $\alpha_{\text{інт.}}$ до величин $\alpha = 1600$, викликане переважанням магнітних різновидів плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових і гнейсів біотит-амфіболових, амфіболових.

Враховуючи інтегральний характер впливу гравітаційноактивних тіл на спостережені поля, у вивченій свердловині ТГ-1 частині розрізу було виконано аналіз середніх значень інтервальної щільності (потужність інтервалу 100 м) від гирла свердловини до її забою. Для встановлення природи виявлених щільнісних неоднорідностей (ущільнення) в межах кожного інтервалу було визначено середні значення щільності для кожного типу окремо і загалом для інтервалу, а також побудовано гістограми розподілу інтервальної щільності (рис. 4). Отримані дані свідчать про відсутність вираженого градієнта щільності з глибиною, а виявлені щільнісні аномалії пов'язані із збільшенням відсоткового складу найбільш щільних компонентів – переважно амфіболітів у верхній частині розрізу і кристалосланців піроксен-біотитових, гнейсів біотит-амфіболових і амфіболових, плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових – в нижній.

Таблиця 3.1

Таблиця розподілу фізичних властивостей гірських порід фундаменту ТГМ вздовж стовбура свердловини ТГ-1 від 0 до 1000 м

Інтервал	0-100		101-200		201-300		301-400		401-500		501-600		601-700		701-800		801-900		901-1000	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
2,55-2,60	1	9,10	1	1,78									2	3,64						
2,60-2,65	7	63,6	18	32,15	14	25,45	15	24,99	5	11,65	17	35,36	28	50,9	15	27,3	14	30,43	21	44,7
2,65-2,70	3	27,3	21	37,51	20	36,36	20	33,32	18	41,94	19	39,52	21	38,18	27	49,1	22	47,84	19	40,4
2,70-2,75			2	3,57	5	9,09	4	6,66	4	9,3	6	12,5	1	1,82	5	9,09	9	19,56	2	4,26
2,75-2,80					2	3,64	1	1,67	2	4,65	2	4,16					1	2,174	1	2,12
2,80-2,85			1	1,79	1	1,82	2	3,33	3	6,99					1	1,82			1	2,12
2,85-2,90			1	1,79	1	1,82			2	4,65										
2,90-2,95			1	1,78	1	1,82	4	6,66	4	9,3					4	7,27			1	2,13
2,95-3,0			2	3,57	5	9,09	3	5,00	4	9,3	2	4,16	1	1,818	2	3,64			1	2,13
3,0-3,05			6	10,72	3	5,45	6	10,00	1	2,33	1	2,08	2	3,64	1	1,82			1	2,13
3,05-3,10			3	5,36	3	5,45	3	1,99												
3,10-3,15							2	3,33			1	2,08								
3,15-3,20																				
3,20-3,25																				
3,25-3,30																				
Σn	11	100	56	100	55	100	60	1400	43	100	48	100	55	100	55	100	46	100	47	100

Таблиця 3.2

Таблиця розподілу фізичних властивостей гірських порід фундаменту ТГМ вздовж стовбура свердловини ТГ-1 від 1001 до 2000 м

Інтервал	1001-1100		1101-1200		1201-1300		1301-1400		1401-1500		1501-1600		1601-1700		1701-1800		1801-1900		1901-2000	
	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%	п	%
2,55-2,60	1	1,96	1	2,5					1	1,75			1	2,08						
2,60-2,65	24	47,1	11	27,5	11	22,88	5	11,11	14	24,56	9	14,06	2	4,16	6	11,3	7	14,28	8	17,0
2,65-2,70	18	35,3	21	60	25	52	20	44,44	25	43,85	14	21,88	20	41,66	25	47,2	26	53,07	24	51,1
2,70-2,75	2	3,92	3	7,5	6	12,5	9	20	6	10,53	7	10,94	14	29,12	10	18,9	6	16,33	6	12,8
2,75-2,80	1	1,96	1	2,5	1	2,08	4	8,89	2	3,51	4	6,25	8	16,64	5	9,43	1	2,04	3	6,38
2,80-2,85	1	1,96			1	2,08			1	1,75	4	6,25	1	2,08	3	5,66			2	4,25
2,85-2,90	1	1,96					3	6,66	2	3,508	2	3,13	1	2,08	5	5,66			3	6,38
2,90-2,95	1	1,96			1	2,08					2	3,13	1	2,08	1	1,89	1	2,04	1	2,18
2,95-3,0	2	3,92			1	2,08	1	2,22			5	7,81					2	4,08		
3,0-3,05							t	2,22	4	7,02	9	14,06					2	4,08		
3,05-3,10							2	4,44	2	3,508	5	7,81					2	4,08		
3,10-3,15											2	3,125								
3,15-3,20											1	1,56								
3,20-3,25					1	2,08														
3,25-3,30					1	2,08														
Σn	51	100	40	100	48	100	45	100	57	100	64	100	48	100	53	100	49	100	47	100

Таблиця 4

Результати розрахунків фізичних властивостей гірських порід, розкритих свердловиною ТГ-1

Назва порід	Щільність в г/см ³									Магнітна сприйнятливість $\alpha \times 10^{-6}$ од. СІ								
	Середня			Немагнітні			Магнітні			Середня			Немагнітні			Магнітні		
	п	σ	ϵ	п	σ	ϵ	п	σ	ϵ	п	α	ϵ	п	α	ϵ	п	α	ϵ
Кристалосланець кварц-магнетит-амфіболово-гранатовий	2	3,23	0,03							2	43500	10500						
Гнейс біотитовий	2	2,64	0,01							2	126	4						
Гнейс біотит-амфіболовий, амфіболовий	22	2,81	0,06	5	2,81	0,03	17	2,81	0,08	22	1937	2130	5	68	21,1	17	2486	2131
Амфіболіт	122	2,98	0,09	55	2,97	0,08	67	2,99	0,1	122	1637	4024	55	62	12	67	2930	5077
Піроксеніт	18	2,96	0,11	11	2,95	0,1	7	2,96	0,13	18	5838	10359	11	59,9	16	7	18550	10410
Мігматит біотитовий	30	2,67	0,03	10	2,68	0,03	20	2,67	0,07	30	275	289	10	46	26	20	389	293
Плагіомігматит біотитовий	323	2,69	0,04	111	2,68	0,04	212	2,69	0,04	323	570	990	111	44	21	212	845	1128
Плагіомігматит амфіболовий, амфібол-біотитовий	39	2,75	0,07	9	2,76	0,06	30	2,75	0,07	39	841	1166	9	50	21	30	1078	1222
Граніт біотитовий немагнітний	161	2,66	0,03							161	46	24						
Граніт біотитовий магнітний	226	2,67	0,03							226	796	937						
Граніт апліто-пегматоїдний	12	2,62	0,02	8	2,61	0,02	4	2,63	0,12	12	155	165	8	76	25	4	314	205
Плагіограніт біотитовий	15	2,68	0,03	12	2,67	0,03	3	2,68	0,05	15	41	67	12	13	21	3	157	66
Плагіограніт біотитовий (магнетитовмісний)	1	2,65	0							1	370	0						
Сланець хлорит-біотитовий	1	2,84	0							1	47	0						
Катаклазит	3	2,63	0,01							3	15	29						

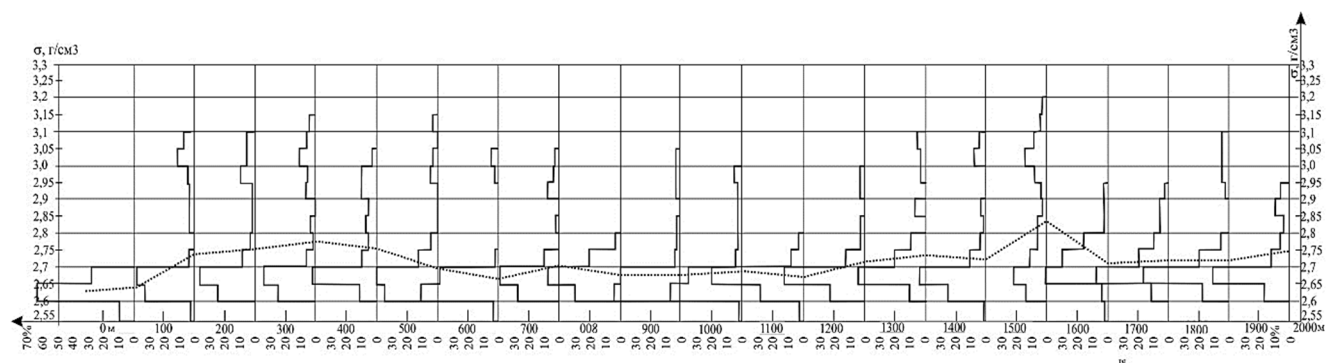


Рис. 4. Гістограми розподілу інтервальної щільності та графік зміни середньої інтервальної густини по свердловині

Дискусія і висновки

Побудовані гістограми розподілу інтервальної щільності та графік зміни її середніх інтервальних значень по свердловині ТГ-1 (рис. 4) показують наявність незначного тренду підвищення щільності з глибиною. У верхній частині свердловини (0 – 100 м) середнє значення інтервальної щільності має показник 2,65–2,67 г/см³, що пов'язано зі зниженням літостатичного тиску та розущільненням порід – діафорезом. В інтервалі глибин 800 – 1200 м показник підвищується до 2,67 – 2,68 г/см³, а глибше до забою – до 2,72 – 2,73 г/см³. Відзначається два інтервали локальних підвищень щільності: на відрізьку глибини 150 – 500 м та більш значуще – до 2,84 г/см³ – на відмітці 1500 – 1600 м. Починаючи з глибини 1200 м відзначається незначне підвищення інтервальної щільності з глибиною. Можливо припустити, що з цієї глибини розпочинає працювати градієнт підвищення щільності з глибиною (вертикальний градієнт щільності порядку 0,01 г/см³/км відповідно до уявлень Тяпкіна (1998)).

Картування докембрійської поверхні і супутнє йому вивчення фізичних властивостей на межі 80–90 рр. минулого століття не дали остаточної відповіді на питання про природу Томаківської регіональної гравітаційної аномалії. Порівняння щільнісних параметрів порід, розвинутих у локальних гравітаційних максимумах і за їх межами, не виявило значних відмінностей.

Для всіх сукупностей порід характерний практично безперервний спектр густини, інтервали яких можуть перекриватися. Частина порід має емпіричні ряди розподілення щільності і магнітних властивостей, значно відмінних, відповідно, від нормального і логнормального законів. Такі породи представлені: гранітоїдами, пегматитами, апліто-пегматитами, аплітами, амфіболітами, сланцями хлорит-актиноліт-тремолітовими, кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-біотитовими породами і мають значно відмінні від нуля коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Тому інтервали зміни фізичних властивостей окремих різновидів порід часто перекривають один одного.

Результати вивчення фізичних властивостей порід, розкритих пробуреною в центральній частині ТГМ вертикальною свердловиною ТГ-1 глибиною 2000 м, показали:

- фізичні властивості порід загалом аналогічні вивченим по площі;
- значно пониженими порівняно з даними площинного опробування є магнітні властивості деяких магнетитовмісних різновидів мігматитів біотитових, гранітів апліто-пегматитових і плагіомігматитів біотитових, що в межах епіцентру максимуму ТГМ викликано певним зубожінням цих порід магнетитом;
- більшість зразків керну зі свердловини ТГ-1 характеризуються незначними варіаціями щільності. На цьому фоні підвищеними значеннями щільності відзначаються тільки амфіболіти, плагіограніти амфіболів, амфібол-біотитові, кристалосланці амфібол-біотитові, які утворюють малопотужні тіла. В найнижчій частині свердловини розріз представлений переважно плагіомігматитами біотитовими із середньою щільністю до 2,75 г/см³, яка до забою свердловини (2000 м) збільшується до 2,88 г/см³;
- в магнітному відношенні вздовж стовбура свердловини виділяються три чітко виражені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожний – на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м і 1400–1500 м, спричинених переважанням магнітних різновидів гранітів біотитових, плагіомігматитів біотитових і амфіболітів ($\Sigma_{\text{інт.}}$ до $3000 \times 4\pi \times 10^{-6}$ Од. СІ). З глибини 1700–1800 м і до забою відзначається закономірне зростання $\Sigma_{\text{інт.}}$ до

величин $\Sigma_{\text{інт.}} = 1600 \times 4\pi \times 10^{-6}$ Од. СІ, викликане переважанням магнітних різновидів плагіомігматитів амфіболів, амфібол-біотитових і гнейсів біотит-амфіболів, амфіболів.

Таким чином, дані вивчення фізичних властивостей керну по свердловині ТГ-1 свідчать загалом про витриманість щільнісних ($\sigma = 2,65\text{--}2,70$) і магнітних параметрів (Σ до 600–700). Відзначаються два інтервали потужністю в перші сотні метрів з підвищеними значеннями щільності і три інтервали з високими значеннями намагніченості. З глибини 1700–1800 м і до забою цієї свердловини відзначається закономірне збільшення щільності і намагніченості кристалічних порід.

У периферійній частині ТГМ передбачається підйом щільних порід, що відзначається концентричними локальними аномаліями Δg_a та просторово пов'язаними з ними геохімічними аномаліями кольорових та рідкісних металів, які є індикаторами глибинного генезису.

Результати вивчення фізичних властивостей геологічного розрізу до глибини 2000 м дозволяють надалі вивчити особливості глибинної природи ТГМ шляхом моделювання гравітаційного та магнітного полів та отримати комплексну модель його будови, яка впливає на формування земної кори та корисних копалин.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

- Берзенин, Б. З., Воронова, С. Г. і др. (1988). *Составление геологической карты докембрийских образований Приднепровского и Приазовского районов Украинского щита м-ба 1:200 000*. ДНВП "Геоінформ України".
- Голиздра, Г. Я. (1988). *Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры*. Недра.
- Гравіметрична розвідка "Цифрова гравіметрична карта України". Загальні вимоги. СОУ 73.1-41-04.02.04:2004. (2004). Державний комітет природних ресурсів України.
- Ентин, В. А., Гуськов, С. И., Орлюк, М. И., Гинтов, О. Б., & Осьмак, Р. В. (2015). Карта абсолютных значений поля силы тяжести территории Украины и некоторые аспекты её возможной интерпретации. *Геофизический журнал*, 37(1), 53–61.
- Есипчук, К. Е., Орс, В. И., Щербаков, М. Б. і др. (1993). *Гранитоиды Украинского щита, петрохимия, геохимия, рудоносность*. Наукова думка.
- Есипчук, К. Ю., Бобров, О. Б., Степанюк, Л. М., Щербак, М. П., Глеваський, С. Б., Скобелев, В. М., Дранник, А. С., & Гейченко, М. В. (2004). *Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита*. УкрДГРІ.
- Каляев, Г. І., Крутиховська, З. О., Жуков, Г. В., Прусс, А. К та ін. (1972). *Тектоніка Українського щита*. Наукова думка.
- Коваленко, В. Ю. і др. (1986). *Комплексная геологическая карта М 1:50 000 планшетов L-36-22-B, Г, -24-B, Г (Отчет Каховской геолого-геофизической партии № 250/81 о групповой геологической съемке 1981–1986 гг.)*. ДНВП "Геоінформ України".
- Крутиховская, З. А. (1971). *Глубинное строение и прогнозная оценка Украинской железорудной провинции*. Наукова думка.
- Купrienko, П. Я., Макаренко, И. Б., Старостенко, & В. И., Легостаева, О. В. (2007а). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофизический журнал*, 29(5), 3–27.
- Купrienko, П. Я., Макаренко, И. Б., Старостенко, & В. И., Легостаева, О. В. (2007б). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофизический журнал*, 29(2), 17–41.
- Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII* (А. В. Чекунов, Ред.). (1988). Наукова думка.
- Насад, А. Г., Коваленко, В. Ю., & Пигулевский, П. И. (2000). К вопросу о глубинном строении земной коры и верхней мантии Среднеприднепровского геоблока. *Геологический журнал*, 4, 15–22.
- Насад, А. Г., Пигулевский, П. И., Кичурчак, В. М., & Радзивилл, А. Я. (1997). О взаимосвязи поверхностных структур докембрийского фундамента Среднеприднепровского и Приазовского геоблоков Украинского щита с поверхностью Мохоровичича. *Геологический журнал*, 1–2, 131–137.
- Організація та проведення геологічного до вивчення раніше закартованих площ масштабу 1:200 000, складання та підготовка до видання Державної геологічної карти України масштабу 1:200 000. Інструкція.* (1999). Геолком України.

- Оровецкий, Ю. П., Красовский, С. С., Калужная, Л. Т. и др. (1997). Строение и эволюция земной коры Приднепровского палеосвода Украинского щита. *Геофизический журнал*, 19(4), 61–68.
- Орса, В. И. (1989). *Гранитообразование в докембрии Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области*. Наукова думка.
- Переверзев, С. И. и др. (1992). *Геологическое строение и полезные ископаемые бассейна р. Томаковки. Отчет о результатах ГГК М 1:200 000 Запорожского антиклинория (Томаковский гравитационный максимум) в пределах листов М-36-XXXV; L-36-V. ДНВП "Геоинформ Украина"*. Пигулевский, П. И. (2012). О результатах магнитотеллурических зондирований в центральной части Среднеприднепровского мегаблока. *Науковий вісник НГУ*, 2, 20–26.
- Пигулевский, П. И., & Свистун, В. К. (2014). *Геолого-геофизическая модель Приазовского мегаблока Украинского щита (анализ, моделирование, результаты)*. Ноулидж.
- Пигулевский, П. Г. (2022). Геотраверс "Граніт" Одеса – Кривий Ріг – Перещепине. *Геофізичний журнал*, 44(6), 88–100. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641>
- Свистун, В. К., Антонов, В. О., & Пигулевский, П. Г. (2020). Підсумки формування бази гравіметричних даних в Україні. *Геоінформатика*, 75(3), 83–91.
- Стандарт комітету природних ресурсів України. Геофізичні дослідження надр. General requirements. СОУ 73.1-41-04.02.04: 2006. (2006). Комітет природних ресурсів України.
- Старостенко, В. И., Гинтов, О. Б., Пашкевич, И. К. и др. (2007). Металлогения Украинского щита: закономерности размещения месторождений рудных полезных ископаемых, связь с глубинным строением и динамикой литосферы. *Геофизический журнал*, 29(6), 3–31.
- Тектонічна карта України. 1 : 1 000 000 (С. С. Круглов & Д. С. Гурський, Ред.). (2007). УкрДГРІ.
- Толстой, М. И., Гасанов, Ю. Л., Костенко, Н. В. та ін. (2003). *Петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання*. Київський університет.
- Тяпкін, К. Ф. (1998). *Фізика Землі*. Вища школа.
- Щербаков, И. Б., Есипчук, К. Е., Орса, В. И. и др. (1984). *Гранитоидные формирования Украинского щита*. Наукова думка.
- Шумлянська, Л., Пигулевский, П. (2024). Побудова та перші результати інтерпретації тривимірної моделі щільності мантії під Українським щитом. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 105(2), 21–28. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.03>
- Pigulevskiy, P. I., & Stovas, O. M. (2022). Seismic geotraverse "Granit" (Ukrainian part). Reanimation. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4, 11–16. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011>
- Pigulevskiy, P., & Shumlianska, L. (2024, April). Geodense section of the lithosphere of the Ukrainian shield along the Shepetivka – Zhytomyr – Dnipro – Volnovakha traverse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), Article 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012087>
- Pihulevskiy, P., Yaremii, S., Tiapkin, O., Logvin, V., & Anisimova, L. (2024, October). Petrophysical Features of the Main Rock Formations of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (Vol. 2024, pp. 1–5). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510092>
- Pihulevskiy, P. H., Kendzera, O. V., Babi, K. V., Anisimova, L. B., & Kyryliuk, O. S. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>
- Pihulevskiy, Petro, Yaremii, Serhii, Anisimova, Larysa, Logvin, Vasyli, Kyryliuk, Oleksandr. (2025, October). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"* (Vol. 2025, pp. 1–5). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552071>
- Shumlianska, L., Pigulevskiy, P., & Vilarrasa, V. (2024). Three-dimensional density model of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/012>
- Svistun, V., & Pigulevskiy, P. (2021, May). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. In *20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects* (Vol. 2021, pp. 1–7). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>
- Tiapkin, O. K., Pihulevskiy, P. H., & Dovbnich, M. M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geocological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.
- References**
- Berzenin, B. Z., & Voronova, S. G. (1988). *Compilation of a geological map of Precambrian formations of the Dnieper and Azov regions of the Ukrainian Shield, scale 1:200 000*. DNPV "Geoinform of Ukraine" [in Russian].
- Entin, V. A., Guskov, S. I., Orlyuk, M. I., Gintov, O. B., & Osmak, R. V. (2015). Map of absolute gravity fields values in Ukraine and some aspects of its possible interpretation. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(1), 53–61 [in Russian].
- Golizdra, G. Ya. (1988). *Complex interpretation of geophysical fields in the study of the deep structure of the earth's crust*. Nedra [in Russian].
- Kalyaev, G. I., Krutikhovskaya, Z. O., Zhukov, G. V., Pruss, A. K. et al. (1972). *Tectonics of the Ukrainian Shield*. Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Kovalenko, V. Yu., et al. (1986). *Complex geological map M 1:50 000 tablets L-36-22-B,G; -24-B,G (Report of the Kakhovka geological and geophysical party No. 250/81 on the group geological survey of 1981–1986)*. DNPV "Geoinform of Ukraine" [in Russian].
- Krutikhovskaya, Z. A. (1971). *Deep structure and prognostic assessment of the Ukrainian iron ore province*. Naukova Dumka [in Russian].
- Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (2007a). Three-dimensional density model of the earth's crust and upper mantle of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 29(5), 3–27 [in Russian].
- Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (2007b). Three dimensional density model of the Earth's crust and upper mantle of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 29(2), 17–41 [in Russian].
- Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII* (A. V. Chekunov, Ed.). (1988). Naukova Dumka [in Russian].
- Nasad, A. G., Kovalenko, V. Yu., & Pigulevskiy, P. I. (2000). On the question of the deep structure of the earth's crust and upper mantle of the Middle Dnieper geoblock. *Geology zhurnal*, 4, 15–22 [in Russian].
- Nasad, A. G., Pigulevskiy, P. I., Kichurchak, V. M., & Radziwill, A. Ya. (1997). On the relationship between the surface structures of the Precambrian basement of the Middle Dnieper and Azov geoblocks of the Ukrainian shield with the Mohorovichich surface. *Geology journal*, 1–2, 131–137 [in Russian].
- Organization and carrying out of geological to study previously mapped areas at scale 1: 200 000, formation and preparation for publication of the State Geological Map of Ukraine at scale 1: 200 000. Instruction*. (1999). Geological Committee of Ukraine [in Ukrainian].
- Orovetsky, Yu. P., Krasovsky, S. S., & Kalyuzhnaya, L. T. (1997). Structure and evolution of the earth's crust of the Dnieper paleoarch of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 19(4), 61–68 [in Russian].
- Orsa, V. I. (1989). *Granite formation in the Precambrian Middle Dnieper granite-greenstone region*. Naukova Dumka [in Russian].
- Переверзев, С. И. et al. (1992). *Geological structure and useful minerals of the Tomakovka River basin. Report on the results of GKG M 1:200 000 of the Zaporizhzhya anticlinorium (Tomakovskiy gravitational maximum) within sheets M-36-XXXV; L-36-V. DNPV "Geoinform of Ukraine"* [in Russian].
- Pigulevskiy, P. I. (2012). About the results of the magnetotelluric sounding of central part of the Srednepridneprovskiy Megablock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 20–26 [in Russian].
- Pigulevskiy, P. I. (2022). Geotraverse "Granite-Odesa-Kryvyi Rih-Pereshchepine". *Geophysical Journal*, 44(6), 88–100 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641>
- Pigulevskiy, P. I., & Svistun, V. K. (2014). *Geological and geophysical model of the Azov megablock of the Ukrainian shield (analysis, modeling, results)*. Knowledge [in Russian].
- Pigulevskiy, P. I., & Stovas, O. M. (2022). Seismic geotraverse "Granit" (Ukrainian part). Reanimation. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4, 11–16. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011>
- Pigulevskiy, P., & Shumlianska, L. (2024, April). Geodense section of the lithosphere of the Ukrainian shield along the Shepetivka – Zhytomyr – Dnipro – Volnovakha traverse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), Article 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012087>
- Pihulevskiy, P., Yaremii, S., Tiapkin, O., Logvin, V., & Anisimova, L. (2024, October). Petrophysical Features of the Main Rock Formations of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (Vol. 2024, pp. 1–5). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510092>
- Pihulevskiy, Petro, Yaremii, Serhii, Anisimova, Larysa, Logvin, Vasyli, Kyryliuk, Oleksandr. (2025, October). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"* (Vol. 2025, pp. 1–5). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552071>
- Pihulevskiy, P. H., Kendzera, O. V., Babi, K. V., Anisimova, L. B., & Kyryliuk, O. S. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>
- Shcherbakov, I. B., Esipchuk, K. E., Orsa, V. I. et al. (1984). *Granitoid formations of the Ukrainian shield*. Naukova Dumka [in Russian].
- Shumlianska, L., & Pigulevskiy, P. (2024). Construction and first interpretation results of the three-dimensional mantle density model under the Ukrainian shield. *Bulletin of Kyiv University. Geology*, 105(2), 21–28 [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.03>
- Shumlianska, L., Pigulevskiy, P., & Vilarrasa, V. (2024). Three-dimensional density model of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011>
- Standard of the Committee of Natural Resources of Ukraine. (2004). *Gravimetric exploration "Digital gravimetric map of Ukraine". General requirements*. SOU 73.1-41-04.02.04:2004. State Committee for Natural Resources of Ukraine [in Ukrainian].
- Standard of the Committee of Natural Resources of Ukraine. (2006). *Geophysical research of soil. General requirements*. SOU 73.1-41-04.02.04:2006. Committee of Natural Resources of Ukraine [in Ukrainian].

Starostenko, V. I., Gintov, O. B., & Pashkevich, I. K. (2007). Metallogeny of the Ukrainian Shield: patterns of distribution of ore mineral deposits, connection with the deep structure and dynamics of the lithosphere. *Geophysical Journal*, 29(6), 3–31 [in Russian].

Svistun, V., & Pigulevskiy, P. (2021, May). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. In *20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects* (Vol. 2021, pp. 1–7). EAGE. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>

Svistun, V. K., Antonov, V. O., & Pigulevskiy, P. G. (2020). Results of the formation of the gravimetric data base in Ukraine. *Geoinformatics*, 75(3), 83–91 [in Ukrainian].

Tectonic map of Ukraine. 1:1,000,000 (S. S. Kruglov & D. S. Gurskiy, Eds.). (2007). UkrDGRI [in Ukrainian].

Tiapkin, O. K., Pihulevskiy, P. H., & Dovbnich, M. M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoeological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.

Tolstoy, M. I., Hasanov, Y. L., Kostenko, N. V., et al. (2003). *Petrochemistry and petrophysics of granitoids of the Ukrainian shield and some aspects of their practical use*. Kyiv University Publishing and Printing Center [in Ukrainian].

Tyapkin, K.F. (1998). *Physics of the Earth*. Vushcha shkola [in Russian].

Yesipchuk, K. E., Orsa, V. I., Shcherbakov, M. B. et al. (1993). *Granitoids of the Ukrainian shield, petrochemistry, geochemistry, ore content*. Naukova Dumka [in Russian].

Yesipchuk, K. Yu., Bobrov, O. B., Stepanyuk, L. M., Shcherbak, M. P., Hlevask, E. B., Skobelev, V. M., Drannyk, A. S., Geychenko, M. V. (2004). *Correlational chronostratigraphic scheme of the early Precambrian of the Ukrainian Shield*. UkrDGRI [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 12.01.26

Прорецензовано / Revised: 13.04.26

Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26

Опубліковано / Published: 29.05.26

Petro PIGULEVSKIY, DSc (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-6163-4486

e-mail: pigulev@ua.fm

S. I. Subbotina Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

PETROPHYSICAL QUALITIES OF ROCKS WITHIN THE TOMAKIV GRAVITY MAXIMUM

Background. The article presents the results of studying the stock and archival materials of geological organizations regarding the physical properties of rocks within the Tomakiv Gravity Maximum (TGM), which is located in the central part of the Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield. The results of previous geological and geophysical studies, which were obtained in the early 90s of the last century, did not provide an answer to its nature. Therefore, the task of the study was to analyze the materials of petrophysical properties of Precambrian formations on their surface and along the Tomakiv deep well shaft TG-1 to a depth of 2000 m. The aim was also to study the features of the geological structure of the Tomakiv deep well shaft.

Methods. The research was based on the stock and archival materials of the geological organizations "Pivdenukrgeologiya" and "Dniprogeofizika" regarding the physical properties of the rocks that make up the Precambrian surface and section of the Tomakiv Gravity Maximum. Materials of petrophysical properties of Precambrian formations along the shaft of the Tomakiv deep well TG-1 to a depth of 2000 m were carefully collected, analyzed, and reinterpreted from the standpoint of modern hypotheses. Based on statistical processing, magnetic-density properties were combined into a unified petrophysical database.

Results. For the first time, a consistent magnetic-density classification of rocks of the Tomakiv Gravity Maximum and sides of greenstone structures has been obtained, covering more than 30 rock varieties. The existing petrophysical lateral heterogeneity of the structure and its changes in the upper part of the earth's crust are explained by an increase in the percentage composition in terms of its densest components, and not by the influence of the density gradient with depth.

The properties of magnetite-containing varieties of biotite migmatites, aplite-pegmatoid granites, and biotite plagiomigmatites are significantly reduced compared to the data of planar sampling. This feature is due to the depletion of magnetite in these varieties within local gravity maxima. Two intervals with a thickness of the first hundreds of meters with increased density values and three intervals with high magnetization values are noted. From a depth of 1700–1800 m to the bottom of this well, a regular increase in the density and magnetization of crystalline rocks is noted. In magnetic terms, along the wellbore, three clearly defined intervals of highly magnetic rocks with a thickness of up to 100 m each at depths of 100–200 m, 1200–1300 m, and 1400–1500 m are distinguished, which is due to the predominance of magnetic varieties of biotite granites, biotite plagiomigmatites, and amphibolites.

Conclusions. The obtained results, which summarize a significant number of physical properties of the samples, allow for more detailed mapping of the Precambrian surface using gravimagnetic fields during geological exploration in search of minerals. The results of studying the physical properties of the geological section to a depth of 2000 m allow for a new consideration of the features of the deep nature of the Tomakiv Gravity Maximum when modeling its structure using gravitational and magnetic fields.

Keywords: Ukrainian Shield, gravitational field, Tomakiv Gravity Maximum, petrophysical properties, structural-tectonic constructure.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.