

Глибинна будова Горішне-Плавнинської структури та загальні принципи геолого-геофізичного вивчення Криворізько-Кременчуцької залізорудної смуги

В.А. Єнтин¹, М.І. Орлюк², О.І. Білоус³, О.Б. Гінтов², В.Г. Малахов¹, В.Г. Бахмутов², І.О. Качан¹, М.І. Бакаржієва², І.Б. Макаренко², О.С. Савченко², Т.М. Самойленко¹, А.В. Марченко², В.В. Друкаренко², Е.Б. Поляченко², С.В. Мичак², А.О. Роменець², О.В. Брайко⁴, 2021

¹Державне підприємство «Українська геологічна компанія», Київ, Україна

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

³Товариство Фергехро Сервіс, Київ, Україна

⁴ПрАТ «Полтавський ГЗК», Горішні Плавні, Україна

Надійшла 16 грудня 2021 р.

У статті викладено результати новітніх досліджень, виконаних у 2021 р. Державним підприємством «Українська геологічна компанія» та Інститутом геофізики НАН України з метою з'ясування морфології та елементів залягання рудного покладу в межах Горішне-Плавнинсько-Лавриківської ділянки Криворізько-Кременчуцької смуги. У процесі виконання геолого-геофізичних досліджень отримано великий масив нових геолого-геофізичних даних щодо глибинних структурно-морфологічних особливостей будови Горішне-Плавнинської структури (ГПС), пов'язаної із Криворізькою глибинною зоною розломів.

Матеріали переінтерпретації виконаних раніше наземних магнітометричних і гравіметричних знімів, результати детальних повисотних аеромагнітних досліджень та вивчення густинних і магнітних властивостей гірських порід структури, у тому числі анізотропії магнітної сприйнятливості, із застосуванням нової апаратури та методик і гравімагнітного моделювання з побудовою об'ємної тривимірної моделі ГПС дали змогу дійти висновку, що ця структура є типовою складкою волочиння з яскраво виявленим підвертанням її південної частини за типом правого зсуву. Первинне формування структури відбувалось як прирозломної смуги осадово-вулканогенних і екструзивних утворень субвертикального залягання та поширення на глибину не менш як 1,5–2 км.

Повним морфологічним та кінематичним аналогом ГПС є раніше вивчена Лихманівська структура, що розміщується у крайній південній частині Криворізько-Кременчуцької смуги. Близькі їй за будовою та кінематикою також залізорудні структури Середнього Побужжя, про первинне прирозломне субвертикальне залягання і сумнівний осадовий генезис яких йшлося і раніше. Згідно з отриманими даними, потрібно по-новому поставитися до вивчення залізорудних і деяких інших родовищ Українського щита, пов'язаних із розломною тектонікою, а також до питань генезису та стратиграфії порід раннього докембрію.

Ключові слова: Україна, залізорудні поклади, геофізичні методи, тензор анізотропії, магнітна та гравітаційна моделі, зсувна тектоніка, монокліналь.

Сдвиги оказывают настолько сильное влияние на развитие складчатых структур, что вполне обоснованно о сдвиговой тектонике можно говорить как об особой форме тектонического развития.

В.Е. Хаин, А.Е. Михайлов, 1985, с. 192

Вступ. Геофізичне вивчення північної (Кременчуцької) частини Криворізько-Кременчуцької залізорудної смуги (ККЗС), у місці сучасного розташування Горішне-Плавнинського кар'єру (рис. 1), було започатковане у 1945 р. роботами під керівництвом З.О. Крутиховської [Крутиховская, 1946]. Геофізичні дослідження методами гравірозвідки і наземної магніторозвідки за сучасними мірками були неповними. Отримані дані дали змогу окреслити загальну смугу магнітних аномалій високої інтенсивності, виділити в її межах окремі шари найбільшої намагніченості і густини (за даними варіометрії), високу інтенсивність яких пов'язували з наявністю магнетитових руд промислового значення.

У результаті проведення геологічних робіт, які включали буріння картувальних і пошукових свердловин, було остаточно визначено геологічну ефективність геофізичної інформації та практичну доцільність детальнішого вивчення всієї смуги Кременчуцьких магнітних аномалій. Передусім смуга була перекрита площовими наземними і аерогеофізичними зніманнями масштабу 1:50000—1:5000 [Безродный и др., 1963; Моль, Шмарьян, 1968; Котченко, 1971; Миллер, 1972, 1973; Карта ..., 1982]. Безпосередньо сучасна територія діючого (робочого) кар'єру бу-



Рис. 1. Сучасний вигляд Горішне-Плавнинського кар'єру (південно-західна стінка).

Fig. 1. Modern view of the Gorishne-Plavninsk quarry (southwestern wall).

ла охоплена магніторозвідкою за мережею 250×50 м та гравірозвідкою за мережею 250×250 м [Безродный, 1963]. Докладно результати цих досліджень висвітлені в колективній монографії [Крутиховская и др., 1975] і в її докторській дисертації [Крутиховская, 1977]. На сучасний погляд, незважаючи на недостатню детальність тодішніх робіт, автори обґрунтували доволі переконливі висновки стосовно глибини залягання Кременчуцької структури [Крутиховская и др., 1972] і прогнозних запасів залізних руд. Щоправда, автори за відсутності тому прямих геологічних доказів, яких не додали і результатів пізнішого буріння свердловини СГ-8 у центральній частині ККЗС [Криворожская ..., 2011], виходили при цьому із загальноприйнятої на той час концепції синклінальної будови більшості залізорудних родовищ світу, яка впливала, за [Горяинов и др., 1988, с. 5], «из логики так называемого здравого смысла: во-первых, что все разновидности метаморфических пород изначально образовывали горизонтально залегающие слои; при этом как бы подразумевалось, что слои достаточно выдержанны по параметрам и, скорее всего, не повторяются в разрезе. Во-вторых, считалось, что основным содержанием наложенных тектонических процессов являлись пликативные деформации».

Слід зазначити, що на той час безперечним доказом віднесення Горішне-Плавнинської структури (ГПС) до геологічних об'єктів синклінального типу вважали зустрічне падіння шарів в її південному вигині. Втім подальші дослідження в цьому напрямі як у межах ККЗС (Лихманівська структура), так і на Побужжі показали, що подібні морфологічні форми відомі і серед об'єктів іншої природи — за типом складок волочиння. Крім того, пізніше, із заглибленням кар'єру, виявилось, що встановлене за даними буріння зустрічне падіння шарів на півдні ГПС з глибиною в обох «крилах» змінюється на однакове в західному напрямку.

Усі результати моделювання окремих складових ККЗС спирались виключно на уявлення синклінальної моделі об'єкта, а результати, що прямо суперечили вказаному положенню, вважали помилковими або їм

приписували випадкову природу. Показовим у цьому сенсі є дані, отримані в результаті інтерпретації гравітаційного та магнітного полів, згідно з якими положення нижніх обмежень магнітних мас було на рівні 2,2—2,5 км [Крутиховская, 1977] (залізородні поклади підсвіт K_2^2 та K_2^3 , сучасна Єристівська та Галещинська ділянки), тобто на 500—700 м нижче підшви густинних утворень, які прийнято інтерпретувати, як амфіболіти. Проте ці дані не відповідали сформованим на той час уявленням про синклінальну природу Кременчуцької структури, тобто шарнір структури мав би проходити вздовж нижнього обмеження амфіболітів, і тому вони були просто проігноровані.

Уперше на роль зсувної тектоніки у формуванні ККЗС звернув увагу К.Ф. Тяпкін [Тяпкін, 1965; Тяпкин и др., 1971], який ґрунтувався на поглядах Дж. Муді та Дж. Хілла [Муди, Хилл, 1960]. Крім того, в публікації [Крутиховская и др., 1969] було наголошено на тісному зв'язку залізородних родовищ з Криворізько-Кременчуцьким глибинним розломом (ККГР), а в публікаціях [Черновский, 1975; Белевцев и др., 1980; Гинтов и др., 1990] увагу було звернуто на моноклінальну будову ККЗС або окремих її частин.

Для подальшого викладу матеріалів вивчення ГПС, яка належить до північної частини ККЗС, доцільно згадати результати тектонофізичного дослідження найпівденнішої частини цієї смуги — Лихманівської структури [Гинтов и др., 1990; Гинтов, 2005], що, як виявилось, дуже подібна до ГПС. При вивченні названої структури вдалось дослідити її структурний і кінематичний зв'язок із зонами сколювання ККГР, наприклад, з Іскрівською (простягання 354°) та Криворізькою (простягання 17°), які добре відслонюються в західній частині структури (на відміну від ГПС через сучасну закритість її флангів забудовою і відвалами).

Узгодженість основних параметрів зон сколювання, особливостей переміщення їх крил і просторового положення головних осей тектонічного поля напружень з морфологічними особливостями Лихманівської структури не залишає сумнівів, щодо її формування за типом складки волочіння:

азимут падіння шарніру складки 340° , кут нахилу — $40\text{—}50^\circ$. При падінні зон сколювання на захід під кутом близько 80° напрямком вектора зсуву по розлому, з яким пов'язана структура, дорівнює: $\varphi = 174/45^\circ$ (перед косою — азимут, за косою — кут нахилу вектора зсуву в площині розлому). Складка волочіння формувалась за відносного переміщення східного крила зони сколювання на південний схід і донизу або західного крила на північний захід і догори [Гинтов, 2005, рис. 3.21, 3.23].

Слід зазначити, що при вивченні Лихманівської структури [Гинтов и др., 1990] була висловлена думка, що ця структура не могла сформуватись із горизонтальної товщі порід, а тільки із субвертикально розташованої моноклінали і отже залізородна товща має не осадове, а внутішньорозломне магматичне або метасоматичне походження. Цьому сприяв досвід роботи авторів на Середньому Побужжі [Каневский, Гинтов, 1972; Гинтов и др., 1985; Ентин, 1987]; питання щодо метасоматичного і магматичного походження залізородних товщ ставилось й раніше і де залізородні породи іменувались товщами, входили до складу дністровсько-бузької або бузької серій і нестратифікувались окремо й детально, як це зроблено на Криворіжжі, зокрема в Горішне-Плавнинській структурі (детально цю проблему розглянуто у статті [Ентин и др., 2015]).

Потрібно також указати на значну роль В.М. Завойського, який разом із З.О. Крутиховською використав геомагнітні дані для вивчення структури залізородних родовищ північного схилу Українського щита. Дослідник розробив методику визначення текстурного еліпсоїда порід за допомогою незворотної магнітної сприйнятливості [Завойский, 1979] для вимірів на астатичному магнітометрі. Головні осі еліпсоїда тензора χ^T В.М. Завойський позначав як χ_1^T (довга вісь), χ_2^T (середня вісь), χ_3^T (коротка вісь), де $\chi_1^T = 1$, $\chi_2^T/\chi_1^T = A_2^T$, $\chi_3^T/\chi_1^T = A_3^T$. Інакше кажучи, форма еліпсоїдів вивчених ним складок волочіння відповідала сплющеному еліпсоїду обертання: $\chi_1^T > \chi_2^T > \chi_3^T$ і $1 > A_2^T > A_3^T$.

У світовій практиці на підставі тих самих закономірностей і методів досліджень, але

з огляду на особливості новітньої апаратури використовують дещо інші позначення складових еліпсоїда анізотропії магнітної сприйнятливості (АМС) [Jelinek, 1977, 1981; Tarling, Hroudá, 1993; Гузій, 1999; Borradaile, Jackson, 2010]: головні компоненти K_{\max} , K_{int} , K_{\min} (або $K_1 > K_2 > K_3$) з відповідними напрямками тривісного еліпсоїда D_i^T , J_i^T . Середнє значення $K_m = (K_1 + K_2 + K_3)/3 \cdot 10^{-5}$ од. СІ; ступінь анізотропії $K_1/K_3 = P$; нормований ступінь анізотропії $H = (K_1 - K_3)/K_m$; магнітна лінійність паралельна максимальній сприйнятливості: $K_1/K_2 = L$; магнітна шаруватість у площині, ортогональній напрямку максимальної магнітної сприйнятливості, $K_2/K_3 = F$; параметр форми $T = (\ln L - \ln F)/(\ln L + \ln F)$. Співвідношення цих параметрів з параметрами В.М. Завойського такі: $K_1 = \chi_1^T$, $K_2 = \chi_2^T$, $K_3 = \chi_3^T$; $P = \chi_1^T / \chi_3^T = 1 / A_3^T$, $L = \chi_1^T / \chi_2^T = 1 / A_2^T$, $F = \chi_2^T / \chi_3^T = A_2^T / A_3^T$, $K_m = \chi_m^T = (\chi_1^T + \chi_2^T + \chi_3^T)/3$, $H = (\chi_1^T - \chi_3^T) / \chi_m^T$, $T = (\ln \chi_1^T - \ln \chi_2^T) / (\ln \chi_1^T + \ln \chi_2^T - 2 \ln \chi_3^T)$.

Вивчивши магнітні властивості порід Білозерської, Західноінгулецької, Саксаганської та Горішне-Плавнинської структур, В.М. Завойський довів, що тензор χ^T незворотної АМС співвісний з тензором зсувної деформації [Завойский, 1982]. При цьому тензори χ^T усіх вивчених структур виявились субвертикальними або крутонахиленими, тобто паралельними шарнірам складок, через що автор спочатку назвав ці структури «стоячими складками» (що неправильно), а потім, за [Муди, Хилл, 1960], складками волочіння. Це суперечило усталеним уявленням про залізородні структури, які традиційно вважають синкліналями (або синкліноріями), тобто шарніри цих структур мають бути горизонтальними. Тому зроблено висновок, що первинні синклінальні структури залізородних порід Криворіжжя були порушені поздовжніми правозсувними розломами і магнітні ознаки синклінальних структур (горизонтальна орієнтація довгих осей тензорів χ^T) «стерті» зсувними процесами з переорієнтацією χ^T з горизонтальних на субвертикальні та крутонахилені.

Для ГПС, яка є предметом цього дослідження, на 5 зразках було отримано 8 значень коефіцієнтів анізотропії [Завойский,

1982]; середні значення: $A_2^T = 0,65$, $A_3^T = 0,20$. Орієнтації довгої і короткої осей тензора показано на стереограмі. Якщо позначити схилення осей тензора через D_i^T , а нахилення через J_i^T , то, згідно із стереограмою, $D_1^T \approx 360^\circ$, $J_1^T \approx 45^\circ$, $D_3^T \approx 100^\circ$, $J_1^T \approx 40^\circ$, тобто довга вісь тензора паралельна шарніру південного замикання структури, що встановлено безпосередньо в кар'єрі ПрАТ «Полтавський ГЗК».

У 1987 р. за методикою В.М. Завойського В.А. Єнтин [Єнтин, 1987] визначив тензори АМС для Молдовської залізородної структури Середнього Побужжя. Її шарнір і крила, як і в деяких інших залізородних структурах цього району (Секретарській, Лащівській, Байбузівській, Савранській), за даними буріння [Доброхотов и др., 1971; Богатырев и др., 1981; Ионис и др., 1986] були субвертикальними. Довгі осі тензора χ_1^T Молдовської структури також виявились крутонахиленими і субвертикальними, що повністю підтвердило теоретичні розрахунки В.М. Завойського.

Геолого-геофізична характеристика.

У 2021 р. на замовлення ПрАТ «Полтавський ГЗК» та при участі геологічного відділу компанії Феррекспо Державним підприємством «Українська геологічна компанія» (ДП «УГК») у співпраці з фахівцями Інституту геофізики НАН України проведено дослідження з метою з'ясування морфології та елементів залягання рудного покладу K_2^2 при зануренні на глибину 2,5—3,0 км у межах Горішне-Плавнинсько-Лавриківської ділянки надр. У процесі виконання зазначених геолого-геофізичних досліджень отримано великий масив нових додаткових геолого-геофізичних даних щодо глибинних структурно-морфологічних особливостей будови ГПС. Повному опрацьовано більшість значущих у цьому сенсі виробничих звітів і наукових публікацій, переглянуто і доповнено новими геологічними даними, отриманими під час експлуатації діючого кар'єру, всі первинні геолого-геофізичні матеріали. За результатами досліджень на площі ГПС побудовано карти вертикальної складової магнітного поля Z_a і аномалій поля сили тяжіння в редукції Буге масштабу 1 : 25 000 (рис. 2, 3).

Горішне-Плавнинсько-Лавриківська ді-

лянка надр завдовжки до 6 км складається з двох рудних покладів підсвіт K_2^2 та K_2^3 (перший та другий залістисті горизонти). Третій залістистий горизонт (K_2^5) також трапляється, але тільки у самій північній частині родовища на глибині 400 м і більше. Всі три поклади мають шарувату форму.

Відповідно до петрографічного кодексу України, смугасті залізисто-крем'яністі утворення ГПС описують як залізисто-силікатні сланці чи як магнетито-кварцитові сланці, підкреслюючи їх загальний смугастий вигляд. На практиці, з акцентом на високу твердість порід, широко вживають інші терміни, такі як залістистий кварцит та/або магнетитово-силікатний кварцит.

Найбільш економічно значущим є рудний поклад магнетитових кварцитів K_2^2 . У плані він обрамляє південний кінець родовища у вигляді підкови. Західне крило виклинюється на відстані 2,5 км, а східне крило суцільне з півдня на північ до Єристівського родовища. Вздовж простягання цей залізорудний поклад має хвилясті і часто хвилеподібні контакти з навколишніми породами розкриву. Його внутрішня структура поєднує в собі складки невеликого розміру і флексурні вигини.

Поклад K_2^2 складається з трьох пачок: $K_{2,1}^2$, $K_{2,2}^2$ та $K_{2,3}^2$. Пачки $K_{2,1}^2$ та $K_{2,3}^2$ здебільшого складаються з червоносмугастих гематит-магнетитових кварцитів, тоді як пачка $K_{2,2}^2$ представлена сіросмугастими кумінгтоніт-магнетитовими кварцитами. Перелічені утворення контактують один з одним, проте віддуються за різкої зміни простягання. Відшарування спостерігається також на контактах зі сланцями K_2^1 і безрудними кварцитами $K_{2,2}^3$. У середині покладу K_2^2 вміст магнетиту значно зменшений у відшаруваннях.

Поклад K_2^3 складається з чотирьох пачок ($K_{2,1}^3$, $K_{2,2}^3$, $K_{2,3}^3$ та $K_{2,4}^3$), з яких $K_{2,1}^3$ і $K_{2,3}^3$ є мінералізованими, а $K_{2,2}^3$ і $K_{2,4}^3$ — це магнетитовмісні сланці і кварцити, які не вважають корисною копалиною. Пачка $K_{2,3}^3$ залягає переважно в центральній частині родовища. У його південній частині цей поклад має вигляд симетричної складки, яка поступово на північ перетворюється на крутоспадну монокліналь.

Пачка $K_{2,1}^3$ тісно прилягає до покладу K_2^2 і має такі самі елементи залягання. Загалом, $K_{2,1}^3$ утворює дискретну розріджену «плівку» невеликої потужності на західній стороні (висячому боці) покладу K_2^2 . Пачка $K_{2,1}^3$ простягається у вигляді компактних лінз або кишень місцями завширшки 10 м за горизонталлю. Показово, що такі кармани за досить невисокого вмісту магнетиту (18%) є легко збагачувальними, з них отримують концентрат із вмістом заліза до 63%.

Загалом поклад K_2^2 і пачка $K_{2,3}^3$ або розділені відносно вузькою слабомінералізованою пачкою $K_{2,2}^3$, або, нечасто, контактують. Поклад K_2^5 відокремлений від пачки $K_{2,3}^3$ сланцями пачки $K_{2,4}^3$ завтовшки від 20 до 100 м і обмежується розломом на заході.

Традиційно структуру родовища описували як комбінацію двох основних структурних елементів: замикання складки синкліналі на її південному кінці та монокліналі розширення родовища на північ. Елементи залягання замикання складки майже однакові в обох крилах: простягання на північний схід під кутом 9° , занурення у північному напрямку під кутом 5° та падіння лінії гребеня складки на північний схід під кутом 10° .

Загальна моноклінальна структура східного крила деформована поперечними зсувами і насувами. В результаті деформації виділяються три блоки різного простягання і падіння: південний (9° простягання на північ-північний схід і падіння під кутом 75° на схід), центральний (10° простягання на північний захід і падіння під кутом $85-90^\circ$ на захід) і північний (15° простягання на північний схід і падіння під кутом 85° на північний схід). У деяких місцях кут падіння монокліналі виположується до 60° на захід. Автори вважають, що оскільки простягання рудного тіла швидко змінюється на відносно невеликій відстані при збереженні напрямку загального простягання, термін «периклінальний» ліпше вживати для опису поперечних деформацій монокліналі.

Інтенсивність поля магнітних аномалій Z_a (50—70 тис. нТл) відображає розподіл указаних гірських порід різної намагніченості (вмісту в них магнетиту), а її внутріш-

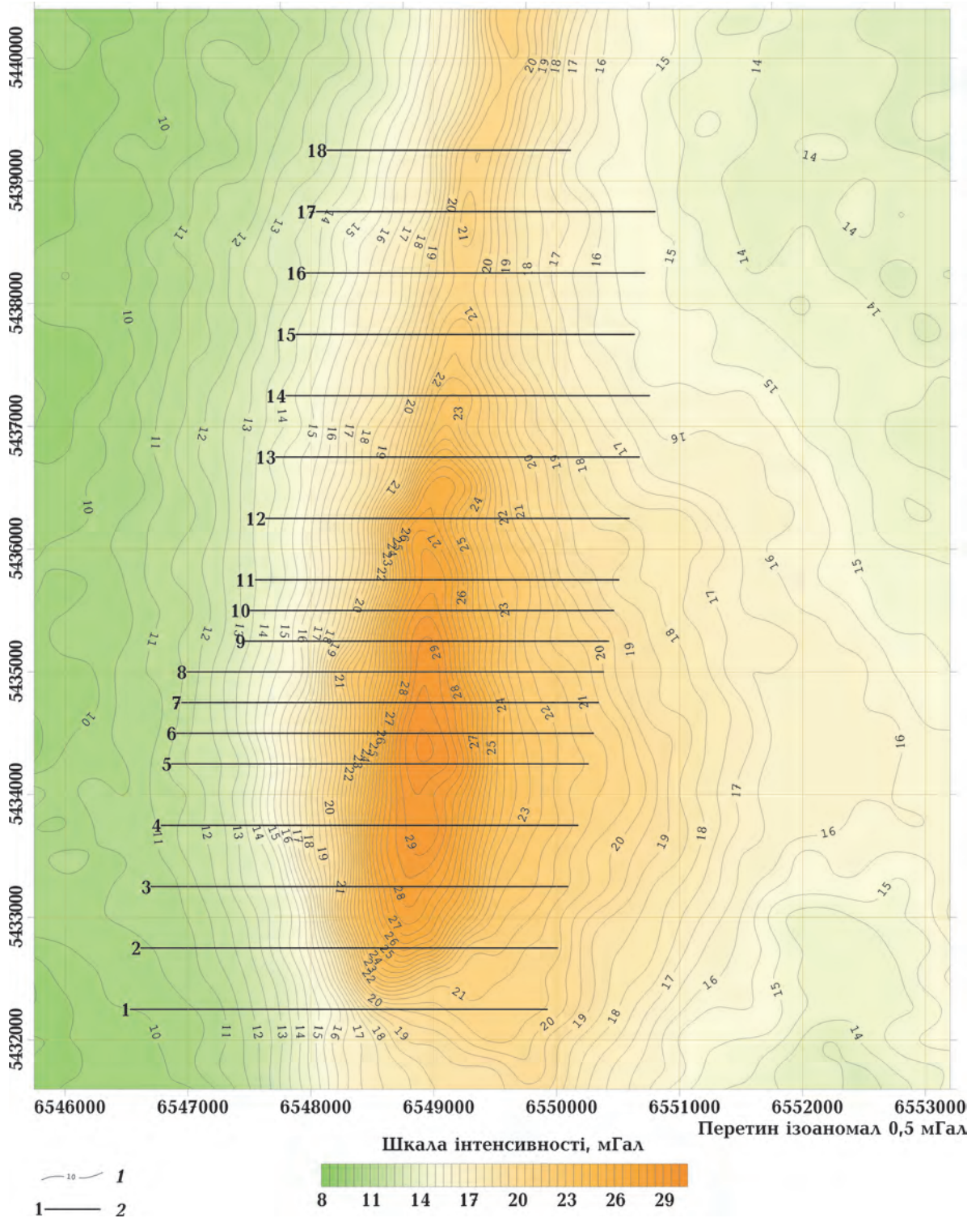


Рис. 2. Карта аномалій Буге ($\sigma = 2,3 \text{ г/см}^3$) Горішнє-Плавнинської структури: 1 — ізонамали в редукції Буге (мГал), 2 — лінії геологічних розрізів.

Fig. 2. Map of Bouguer anomalies ($\sigma = 2.3 \text{ g/cm}^3$) of the Gorishne-Plavninsk structure: 1 — isoanomalals in the Bouguer reduction (mGal), 2 — lines of geological sections.

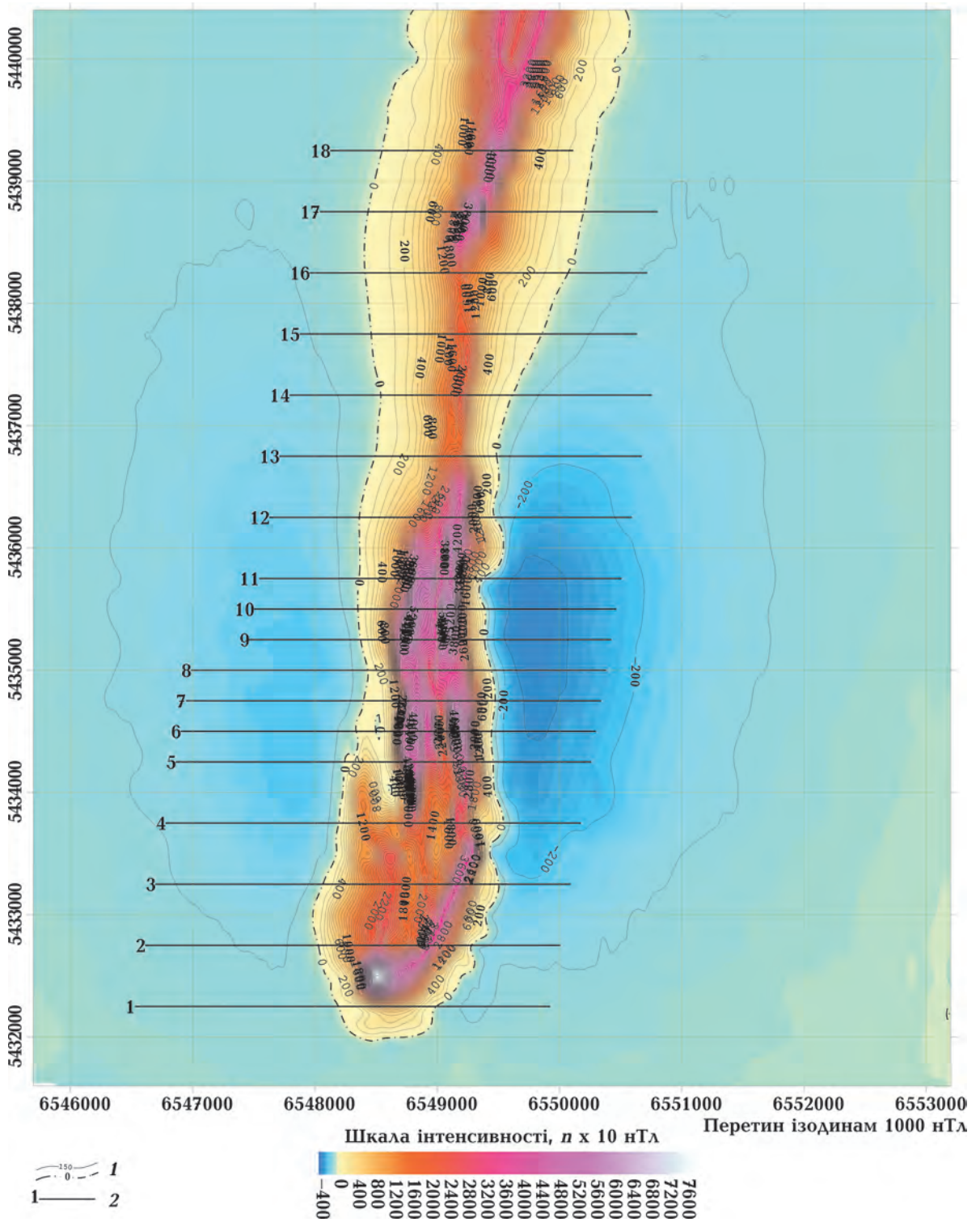


Рис. 3. Карта аномалій Z_a Горішне-Плавнинської структури: 1 — ізодинами Z_a ($n \times 10$ нТл), 2 — лінії геологічних розрізів.

Fig. 3. Map of anomalies Z_a of the Gorishne-Plavninsk structure: 1 — isodynamas Z_a ($n \times 10$ nT), 2 — lines of geological sections.

ня структура пов'язана з описаними структурно-морфологічними ознаками залягання рудних покладів. Проте якщо за геолого-гірничими даними східний ланцюг локальних максимумів Z_a на всьому контурі аномалії на рівні ерозійного зрізу в цілому добре відповідає розміщенню рудного покладу товщі K_2^2 , то західний ланцюг приблизно тієї ж амплітуди в плані відповідає утворенням непромислового покладу товщі K_2^3 . На це звернула увагу ще З.О. Крутиховська [Крутиховская, 1953], яка зазначала, що є можливість виділення в цій товщі шарів з високим вмістом магнетитового заліза.

Поле аномалій сили тяжіння має каплеподібний вигляд і в загальних контурах корелюється з магнітним, але воно помітно спотворено, особливо у південно-східній частині, впливом вмісних порід значної густини (амфіболітів).

Результати досліджень. Намагніченість та густина порід. З метою розширення бази вивченості фізичних властивостей порід ГПС у різних відкритих частинах високомагнітного середовища Горішне-Плавнинського кар'єру за спеціальною методикою, з використанням сонячного компаса, було відібрано близько 150 орієнтованих зразків гірських порід (ділянки відбору див. на рис. 4). Виміри магнітної сприйнятливості зразків та її анізотропії виконували на містку змінного струму (Karrabridge) МФК1-ФВ у 15 позиціях для кожного зразка за змінного поля 200 А/м на частоті 976 Гц. Величину і напрямок природної залишкової намагніченості зразків вимірювали на астатичному магнітометрі LAM-24 у 12 позиціях зразка у положенні «між магнітами». Густина визначали класичним методом за допомогою ареометра.

Крім орієнтованих зразків додатково були досліджені 83 зразки із різних частин і горизонтів структури з метою отримання повнішої узагальненої характеристики магнітної сприйнятливості та густини порід розрізу. Для всіх зразків визначено густину порід, скалярні магнітні параметри (магнітну сприйнятливість, природну залишкову намагніченість, відношення залишкової та індуктивної намагніченості — фактор Q) і векторні магнітні параметри, зокрема про-

сторове положення вектора залишкової намагніченості й тензора анізотропії магнітної сприйнятливості.

Результати досліджень дали змогу зробити такі висновки. За параметрами густини магнетитовмісні поклади і породи, що вмщують рудні тіла, статистично різняться. Об'ємна маса магнетитових і кумінгтоніт-магнетитових кварцитів рудних пачок ($K_{2,1}^2$, $K_{2,2}^2$, $K_{2,3}^2$) становить у середньому 3,50; 3,40 і 3,60 г/см³ відповідно, тоді як об'ємна маса менш збагачених магнетитом покладів ($K_{2,2}^3$) дорівнює 3,13; сланців — 2,77; амфіболітів — 2,95 г/см³. За параметрами магнітної сприйнятливості спостерігається аналогічна тенденція: максимальні значення встановлено в рудних пачках $K_{2,1}^2$, $K_{2,2}^2$, $K_{2,3}^2$ — близько 1,0 од. СІ, у пачці $K_{2,2}^3$ — близько 0,4 од. СІ, сланцях і амфіболітах — відповідно 0,09 і 0,001 од. СІ. Значення природної залишкової намагніченості також найбільші у шарах рудного тіла, але характеризуються досить широким діапазоном і в середньому варіюють від 35 до 100 А/м, у сланцях і амфіболітах — відповідно 4,5 і 0,0058 А/м. Відношення залишкової намагніченості до індуктивної (фактор Кенігсбергера Q) для порід рудного тіла набуває значень від 1,3 до 2,6, для сланців — близько 1,1, для амфіболітів — 0,1.

Виявлено високий кореляційний зв'язок між параметрами густини і магнітної сприйнятливості для шарів K_2^2 і K_2^3 (рис. 5).

Середні напрямки природної залишкової намагніченості (ПЗН) не зовсім збігаються з напрямком сучасного геомагнітного поля (поля диполя) у районі робіт. Середній напрямок для всіх зразків рудних пластів ($D = 0,5^\circ$; $I = 40,3^\circ$) суттєво відхиляється від напрямку головного магнітного поля ($I = 66,5^\circ$). У деяких утвореннях ($K_{2,3}^2$, $K_{2,2}^3$) таке відхилення незначне і сягає кількох градусів з напрямком у бік зменшення. Навпаки, в інших рудних пачках ця розбіжність досягає 30—35°. Найбільше відхилення від напрямку сучасного геомагнітного поля мають амфіболіти ($D = 326^\circ$; $I = 16^\circ$).

Результати досліджень тензора АМС у межах ГПС із застосуванням точнішої апаратури та нових програмних комплексів і

на більшій кількості зразків порівняно із результатами роботи [Завойский, 1982] потребують детального пояснення. Для всіх порід структури було отримано осереднені параметри: $P(K_1/K_3) = 1,5$; $L(K_1/K_2) = 1,1$; $F(K_2/K_3) = 1,3$. Окремо визначені параметри для залізородної товщі практично ідентичні. Таким чином, тензору АМС, а отже, і тензору деформації структури відповідає тривісний сплющений еліпсоїд обертання. Матеріали 146 визначень головних осей K_1 і K_3 показано на рис. 5, а.

Стереограма на рис. 6, а K_1/K_3 демонструє збіжність середньої орієнтації тензора АМС з матеріалами, наведеними у праці [Завойский, 1982]: меридіональна орієнтація осі K_1 ($D_1^T \approx 358^\circ$) і широтна — осі K_3 ($D_3^T \approx 85^\circ$). Показники нахилення осі K_1 на північ, у середньому $J_1^T \approx 40^\circ$, також однакові. Коротка вісь K_3 нахилена на схід під кутом $J_3^T \approx 5\text{—}10^\circ$, тобто ближча до горизонтальної. Однак з огляду на те, що маємо справу з еліпсоїдом обертання, нахилення осі K_3 не відіграє великої ролі. З діаграми на рис. 6, б бачимо, що середній ступінь анізотропії $P \approx 1,5$ визначений, головним чином, на високомагнітних зразках, тобто по рудному тілу. Діаграма на рис. 6, в тільки підкреслює значну різноманітність форм еліпсоїдів АМС — від кулеподібної, коли $L \approx F \approx 1$, до дископодібної, коли $L \approx 1$, а $F \gg \gg 1$. Напрямок і кут падіння осі K_1 відображає напрямок і кут падіння шарніра південного замикання Горішне-Плавнинської структури, що підтверджується вимірами шаруватості порід у кар'єрі ПрАТ «Полтавський ГЗК». Цей напрямок дуже близький до напрямку D, J природної залишкової намагніченості, яка перевищує індуктивну намагніченість у 2—3 рази. Інакше кажучи, формування тензора АМС, найімовірніше, відбулось на початку утворення ГПС, а не пізніше, що важливо.

Основні параметри тензора еліпсоїда АМС зразків варіюють залежно від типу порід і добре узгоджуються з визначеннями аналогічних параметрів В.М. Завойського. Ступінь анізотропії P (близько 1,8) та параметр сплющеності F (близько 1,7) у рудних шарах досить високі, але найвищі показни-

ки ступеня анізотропії мають сланці ($P = 2,05$). Водночас лінійність (L) в усіх породах слабо виражена і в середньому становить: $L = 1,1$. Найменші значення анізотропії сплющеності та лінійності встановлено для амфіболітів.

У напрямках осей еліпсоїдів АМС не спостерігається явної закономірності групування залежно від типу порід, але напрямки переважно групуються у кластери. При цьому середні напрямки максимальної осі еліпсоїдів АМС (K_1) мають субмеридіональне простягання ($D = 353^\circ$) і кут падіння $I = 40^\circ$, а мінімальної осі — західно-східне простягання ($D = 85^\circ$) і незначний кут падіння ($I = 3^\circ$). Максимальні і середні осі еліпсоїдів АМС розташовуються уздовж площини пластів, а мінімальна вісь — по нормалі до площини. Ці результати, особливо напрямки максимальної осі K_1 , добре узгоджуються з даними В.М. Завойського, отриманими раніше.

У підсумку можна стверджувати, що визначення тензора АМС дає велику впевненість у тому, що ГПС є складкою волочіння, утвореною в результаті зсувного процесу вздовж ККЗР. Як показують матеріали моделювання [Шерман и др., 1991] і теоретичні розробки [Гинтов, 2005], у разі зсувів уздовж розломів у породах будь-якого складу, що прилягають до розлому, формуються складки волочіння з шарнірами, перпендикулярними до напрямку (вектора) зсуву. В нашому випадку кут нахилу осі шарніру у південному замиканні структури, встановлений вимірами елементів залягання порід у кар'єрі, дорівнює $40\text{—}50^\circ$ на північ. Отже, напрямок вектора зсуву по розлому (чи системі розломів), з яким (чи з якими) пов'язана структура, дорівнює: $\varphi = 178^\circ / (50\text{—}40^\circ)$ (перед косою — азимут, за косою — кут нахилу вектора зсуву в площині розлому). Цікаво, що цей параметр майже збігається з наведеним вище параметром φ Лихманівської структури.

Аеромагнітні дослідження. Важливим етапом геолого-геофізичних досліджень у межах діючого Горішне-Плавнинського кар'єру стало проведення тут аеромагнітного знімання на декількох висотах польоту. Аеро-

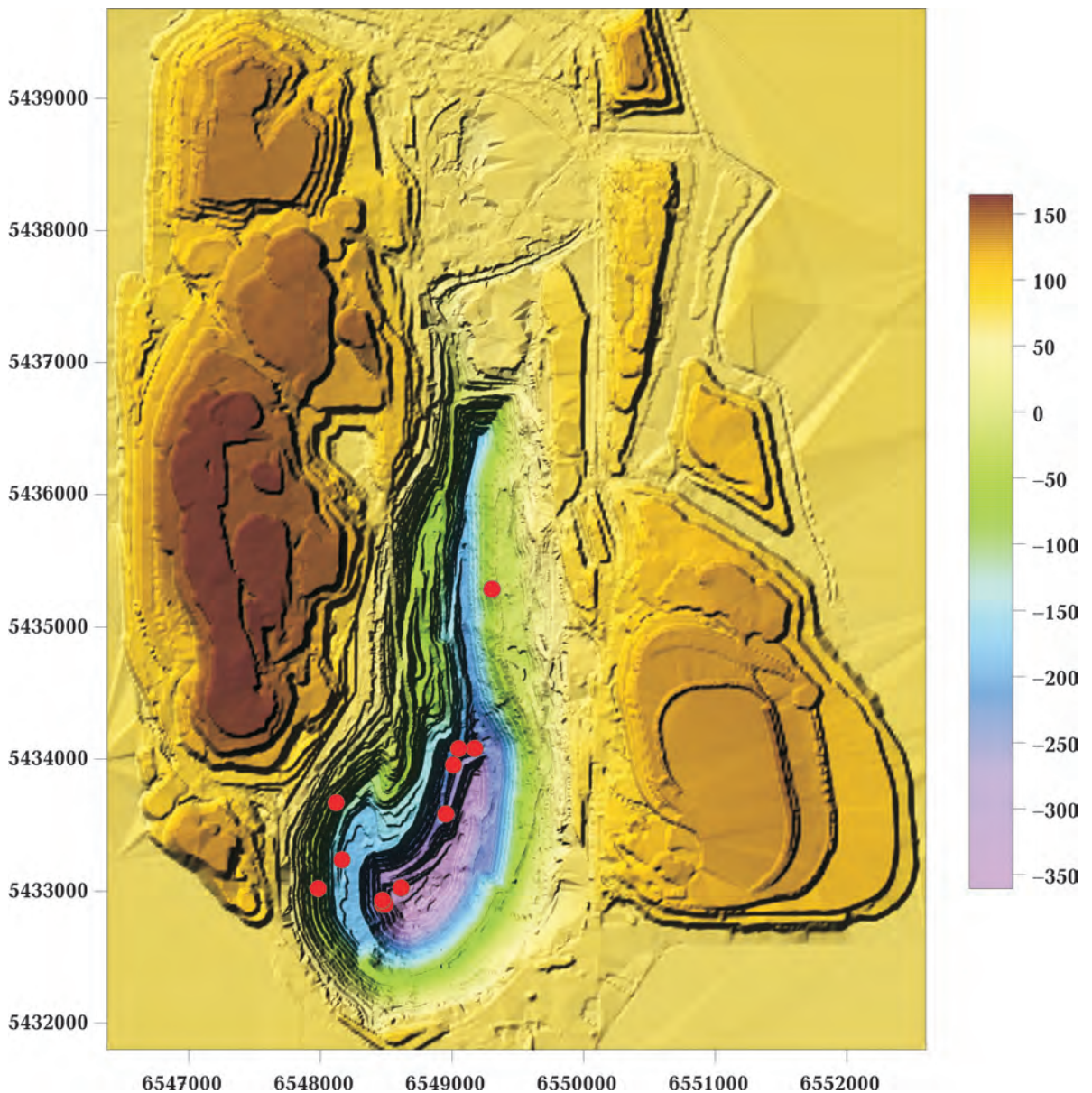


Рис. 4. Ділянки відбору орієнтованих зразків для визначення магнітних і густинних властивостей гірських порід зображені на схемі рельєфу Горішне-Плавнинського кар'єру.

Fig. 4. Sites of oriented samplings for determination of magnetic and density properties of rocks depicted on the structural diagram of the Gorishne-Plavninsk open pit.

магнітні дослідження виконували з метою зіставлення стану сучасного аномального магнітного поля з даними наземної магніто-розвідки, проведеної ще до початку експлуатації родовища (до 1963 р.). Аеромагнітне знімання виконано з дотриманням стандартних вимог до такого виду геофізичних робіт, а виділення аномальної частини геомагніт-

ного поля — з використанням моделі поля DGRF/IGRF для епохи 2021 р. [DGRF/IGRF ..., 2020].

Метою робіт передбачалось отримати додаткові нові дані щодо особливостей морфології та глибинної будови структури, особливо в частині достовірнішого визначення таких важливих параметрів для створення коректної глибинної моделі ро-

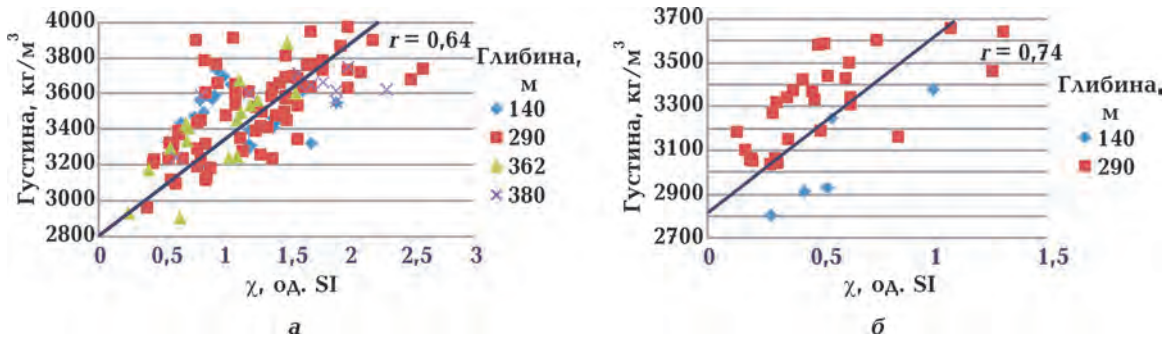


Рис. 5. Діаграма кореляційного зв'язку між густиною та магнітною сприйнятливістю зразків порід горизонтів K_2^2 (а) і K_2^3 (б).

Fig. 5. Diagram of the correlation relationship between the density and magnetic susceptibility of rock samples of the horizons K_2^2 (a) і K_2^3 (б).

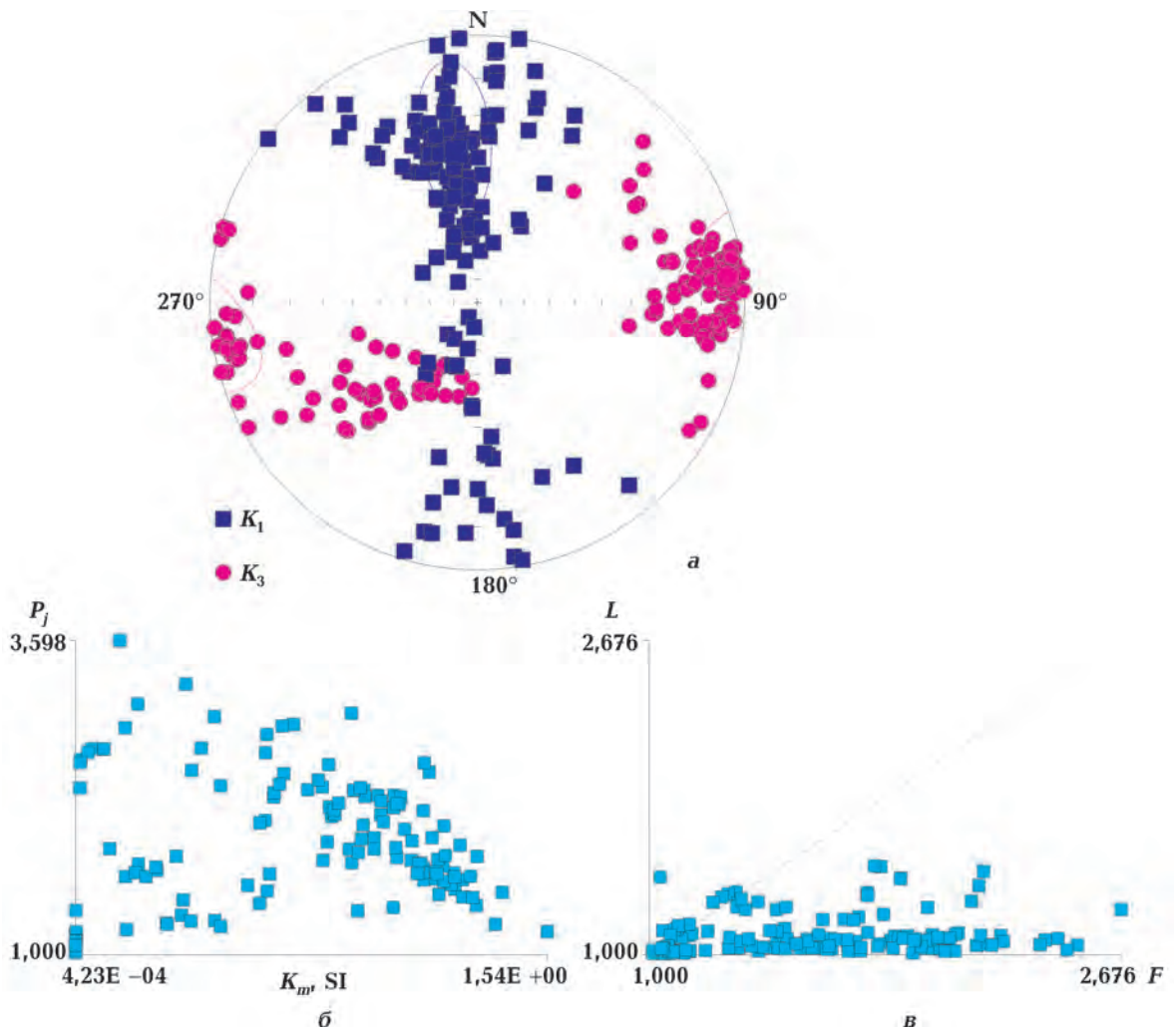


Рис. 6. Розподіл напрямків тензора АМС (K_1 — максимальна вісь, K_3 — мінімальна вісь) зразків порід на рівнокутовій стереопроєкції ($N = 146$): а — на нижню півсферу, географічна система координат; б — діаграма співвідношення магнітної сприйнятливості (K_m) та параметра її анізотропії (P_x); в — діаграма співвідношення ступеня магнітної сплюсненості F і ступеня магнітної лінійності L .

довища першого наближення, як глибина занурення і інтегрований кут нахилу промислового рудного шару в його південній, центральній і північній частинах. У результаті очікувалось отримати дані щодо швидкості згасання амплітуди локальної складової поля $(\Delta T)_a$ уздовж простягання кар'єру в площині однієї висоти польоту та за висотою — вздовж одного маршруту на різних висотах. Ці параметри якісно пов'язані з положенням нижніх обмежень магнітних об'єктів — у разі їх заглиблення зменшується швидкість згасання. Разом з тим з'являється можливість використати додатковий до вертикальної складової наземного магнітного поля Z_a параметр — модульне значення аномалій повного вектора $(\Delta T)_a$, що в результаті підвищує комплексність, а тим самим і достовірність розв'язання задачі моделювання геологічного розрізу.

Обстеження площі навкруги кар'єру та проведення контрольно-методичних польотних маршрутів показали, що як безпосередньо в межах діючого кар'єру, так і за його межами, існують штучні магнітні завади значної інтенсивності (див. рис. 4), які зумовлені наявністю відвалів порід покриву, роботою гірничої техніки і наявністю промислової інфраструктури. Ці особливості потрібно враховувати в подальшому процесі моделювання ГПС за даними магніторозвідки. Тому оптимальними для аеромагнітного знімання були визнані висоти польотів як на низьких рівнях (100, 250 м), які найбільш чутливі до штучних завод, так і на вищих (500, 1000 м), на яких ліпше відображуються глибинні фактори геологічної будови ГПС.

Аналіз результатів аеромагніторозвідки щодо особливостей глибинної будови Горішне-Плавнинської залізорудної структури зводиться до таких висновків.

Зі збільшенням висоти польотів магнітне поле поступово спрощується, але, що важливо, планове положення генеральної осьо-

вої лінії максимальних значень майже практично не змінюється і не мігрує послідовно в той чи інший бік. Це вказує на субвертикальне моноклінальне падіння рудних покладів у центральній і північній лінійних частинах ГПС. У супротивному випадку положення максимумів поступово, зі збільшенням висоти мало б зміщуватись у бік падіння шарів структури. Такий висновок підтверджується майже симетричною морфологією крил аномалій поля $(\Delta T)_a$ уздовж профілів спостережень на всіх виконаних висотах польотів.

Внутрішні незначні зміни у простяганні окремих локалізованих магнітних аномалій, як і незначна планова міграція їх екстремумів, що спостерігається за даними польотів на висотах 100—500 м і даними наземної магніторозвідки, в основному зумовлені штучно створеними магнітними відвалами та вибраними в процесі експлуатації кар'єру значними масами магнітної руди.

Внутрішній план-малюнок магнітного поля вже починаючи з висоти 500 м (рис. 7) набуває загального вигляду, пов'язаного зі структурою північ-північно-східного простягання, яка в районі ліній геологічних розрізів 13—15 розтягується на два блоки.

Від геологічних розрізів 5 і 6 і далі на північ на всіх висотах польотів спостерігається в цілому витримана відстань (з незначною тенденцією її збільшення у північній частині і зменшення — у центральній) між положенням максимумів і спряженими з ними мінімумами магнітних аномалій, що засвідчує відповідні зміни глибини занурення нижньої кромки магнетитових тіл. Підтвердженням тому є і такого самого характеру швидкість згасання магнітних аномалій в напрямку з півдня на північ на одній висоті польоту, що наочно можна бачити на карті показника цього параметра на висоті польоту 500 м (рис. 8).

Fig. 6. Distribution of AMS tensor directions (squares — maximum axis K_1 , circles — minimum axis K_3) of rock samples on equiangular stereoprojection (lower hemisphere, geographic coordinate system) (a); diagram of correlation of the magnetic susceptibility (K_m) and anisotropy parameter (P_j) (b); diagram of correlation of degree of the magnetic flattening F and magnetic linearity degree L (b).

Отримані на різних рівнях польотів характерні геофізичні ознаки з великою ймовірністю можуть вказувати на первинну генетично-морфологічну єдність ГПС, порушену під дією пізніших тектонічних процесів зсувної кінематики. Останні обставини особливо відбилися у її південній торцевій частині (утворення кривокоподібного замикання).

Таким чином, отримані за аналізом попередніх геолого-геофізичних досліджень дані, доповнені сучасними результатами всебічного вивчення магнітних і густинних властивостей утворень ГПС та комплексної інтерпретації матеріалів гравірозвідки, наземної і полівисотної аеромагніторозвідки були покладені в основу створення належним чином обґрунтованої структурно-петрофізичної моделі ГПС першого наближення у вигляді тривимірного видовженого тіла субвертикально-моноклінального характеру падіння з внутрішньою шаруватою текстурою.

Структурно-петрофізична модель. Утворена на вказаних засадах якісна модель ГПС першого наближення пройшла трьохстадійну верифікацію за результатами тривимірного гравімагнітного моделювання. Зауважимо, що моделювання виконували за кількома програмно-алгоритмічними комплексами інтерпретації геомагнітних і гравітаційних даних щодо розробки 3D магнітних й гравітаційних моделей з урахуванням тензора анізотропії магнітної сприйнятливості порід та вектора залишкової намагніченості [Старостенко, 1978; Завойский, 1982; Коваленко-Завойський, Іващенко, 2006; Орлюк и др., 2008; Старостенко и др., 2015]. Для цього раніше з використанням наведених технологій геофізичного моделювання були отримані суттєві результати щодо розробки 3D моделей різномасштабних структур земної кори та їх петролого-тектонічної інтерпретації стосовно встановлення будови і еволюції літосфери Землі і дрібномасштабного прогнозування корисних копалин [Орлюк, 2000; Орлюк та ін., 2013; Пашкевич и др., 2006; Старостенко и др., 2008].

Першим етапом указанного технологічного процесу було встановлення кількісної від-

повідності моделі першого наближення даним наземної магніторозвідки, розрахованим за 16 перерізами, ортогональними до генерального простягання ГПС, що в подальшому було завірено на умовах відповідності моделі вже полю $(\Delta T)_a$ на висоті польоту 500 м. В останньому випадку вже у первинно одержану, кількісно скореговану геологічну модель вносили корективи за вибрані маси магнітних рудних утворень і нагромаджених за його межами відвалів. При моделюванні за магнітними даними була задіяна одна із версій програми «GSS-Potent» [Geophysical ..., 2021].

Отримані у такий спосіб геологічні розрізи були ще раз додатково верифіковані шляхом кількісної (на основі використання програми «GMT-Auto») [Старостенко и др., 2015] перевірки їх відповідності полю аномалій сили тяжіння.

За узгоджений кінцевий результат інтерпретації прийнято варіант геологічної моделі, яка відповідала, з одного боку, загальній концепції моноклінальної будови ГПС зі встановленими петрофізичними властивостями її складових, а з іншого — параметрам всіх трьох спостережених аномальних геофізичних полів (рис. 9).

З урахуванням отриманих за розрахунками значень густини та магнітної сприйнятливості за профілями 5—17 для покладів K_2^2 , K_2^3 та K_3^3 виявлено значущу кореляційну залежність (рис. 10). Отриманий коефіцієнт кореляції $r = 0,68$ між розрахованими густиною та магнітною сприйнятливістю є близьким до коефіцієнта кореляції цих параметрів для покладів K_2^2 та K_3^3 , визначеного за експериментальними вимірами на зразках. Подібна відповідність вимірних та розрахованих значень густини і магнітної сприйнятливості та високий рівень кореляції є певним підтвердженням геолого-геофізичної коректності побудованої гравімагнітної моделі ГПС.

Результати геолого-геофізичного моделювання ГПС за розробленою і реалізованою технологією комплексного використання гравімагнітних даних візуалізовано у вигляді узагальненої блок-схеми будови

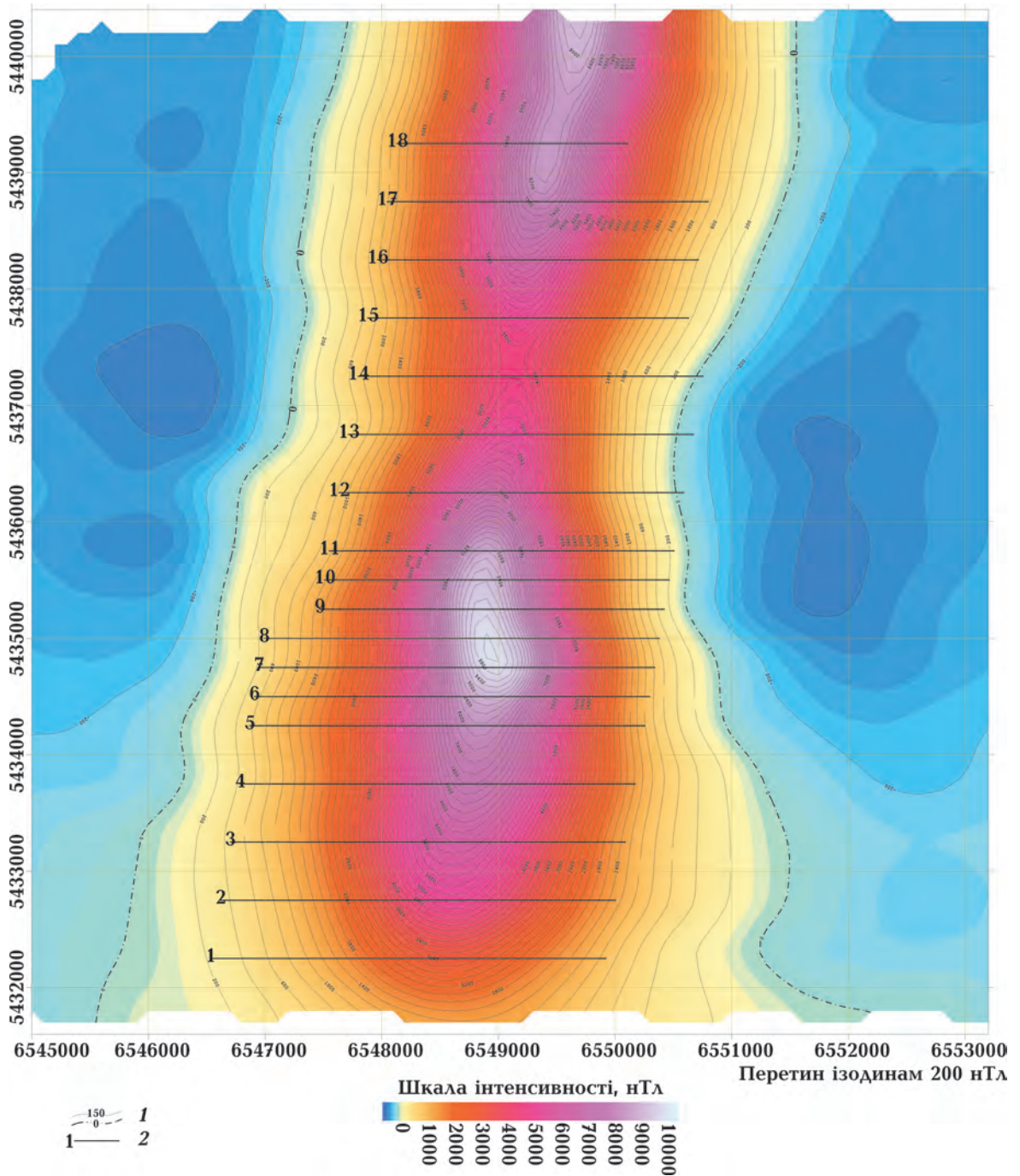


Рис. 7. Карта аномального магнітного поля $(\Delta T)_a$ (висота польоту $H = 500$ м). Умовні позначення див. на рис. 3.

Fig. 7. Map of the anomalous magnetic field $(\Delta T)_a$ (flight height $H = 500$ m). See symbols in Fig. 3.

ГПС (рис. 11) і каркасної тривимірної моделі її східного крила з трьох боків у форматі програми «Micromain» (рис. 12).

Слід зазначити, що застосована технологія геолого-геофізичних досліджень Го-

рیشнє-Плавнинської структури та отримана модель просторового поширення та фізичних параметрів залізорудних товщ, відповідно відрізняються від змісту подібних робіт у низці публікацій [Kerr et al., 1994; Lan-

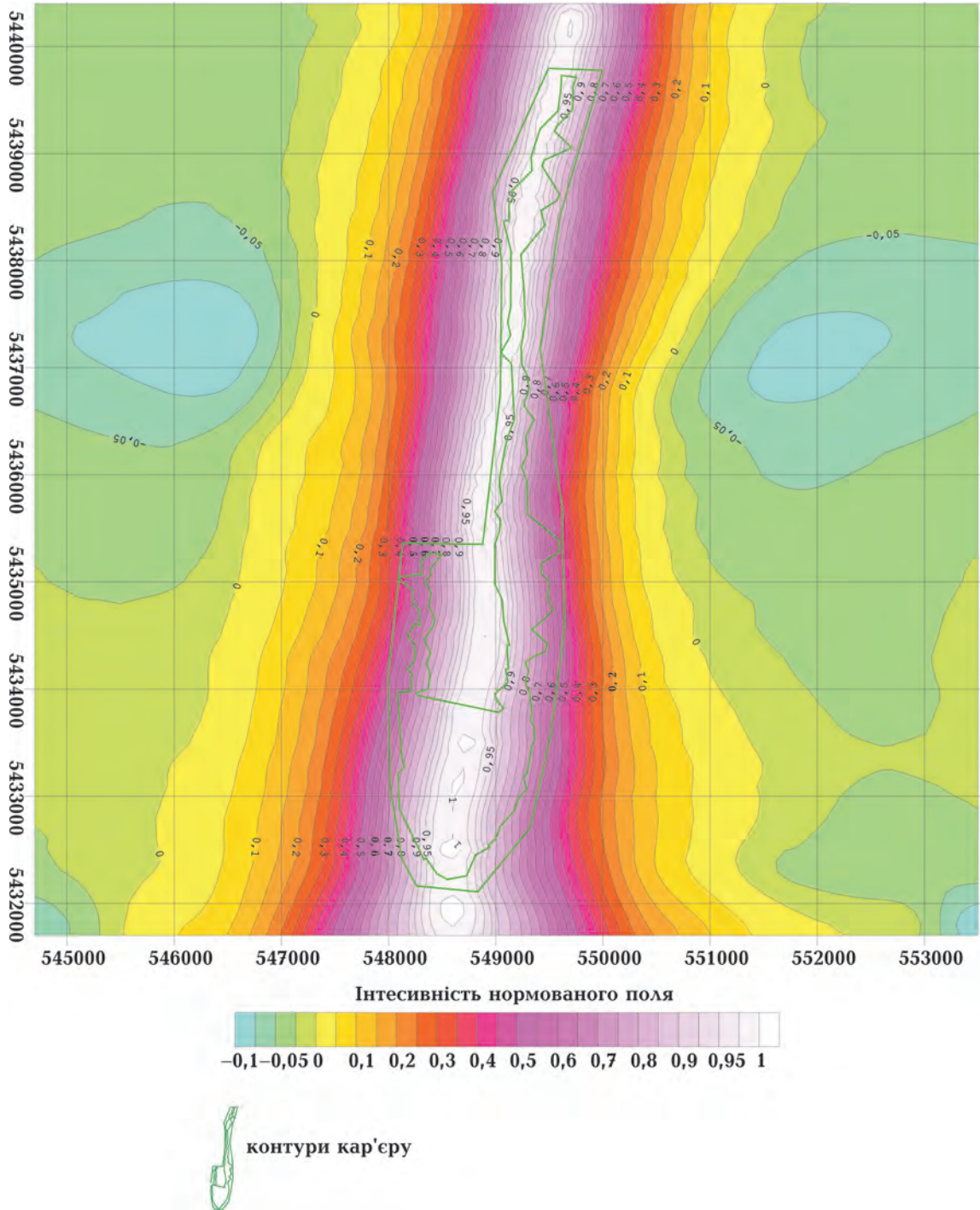


Рис. 8. Карта показника відносної швидкості згасання поля $(\Delta T)_a$ на висоті польоту 500 м $((\Delta T)_{ai}/(\Delta T)_{\max})$.

Fig. 8. Map of relative field attenuation rate $(\Delta T)_a$ laterally at 500 m of flight height $(\Delta T_{ai}/\Delta T_{\max})$.

za, Melani, 2006; Borradoile, Jackson, 2010; Oyedele et al., 2016; Liu et al., 2018; Bastani et al., 2019], в яких висвітлено лише окремі ме-

тодичні та результативні аспекти вивчення об'єктів такого типу і не розглянуто їх цілісного бачення.

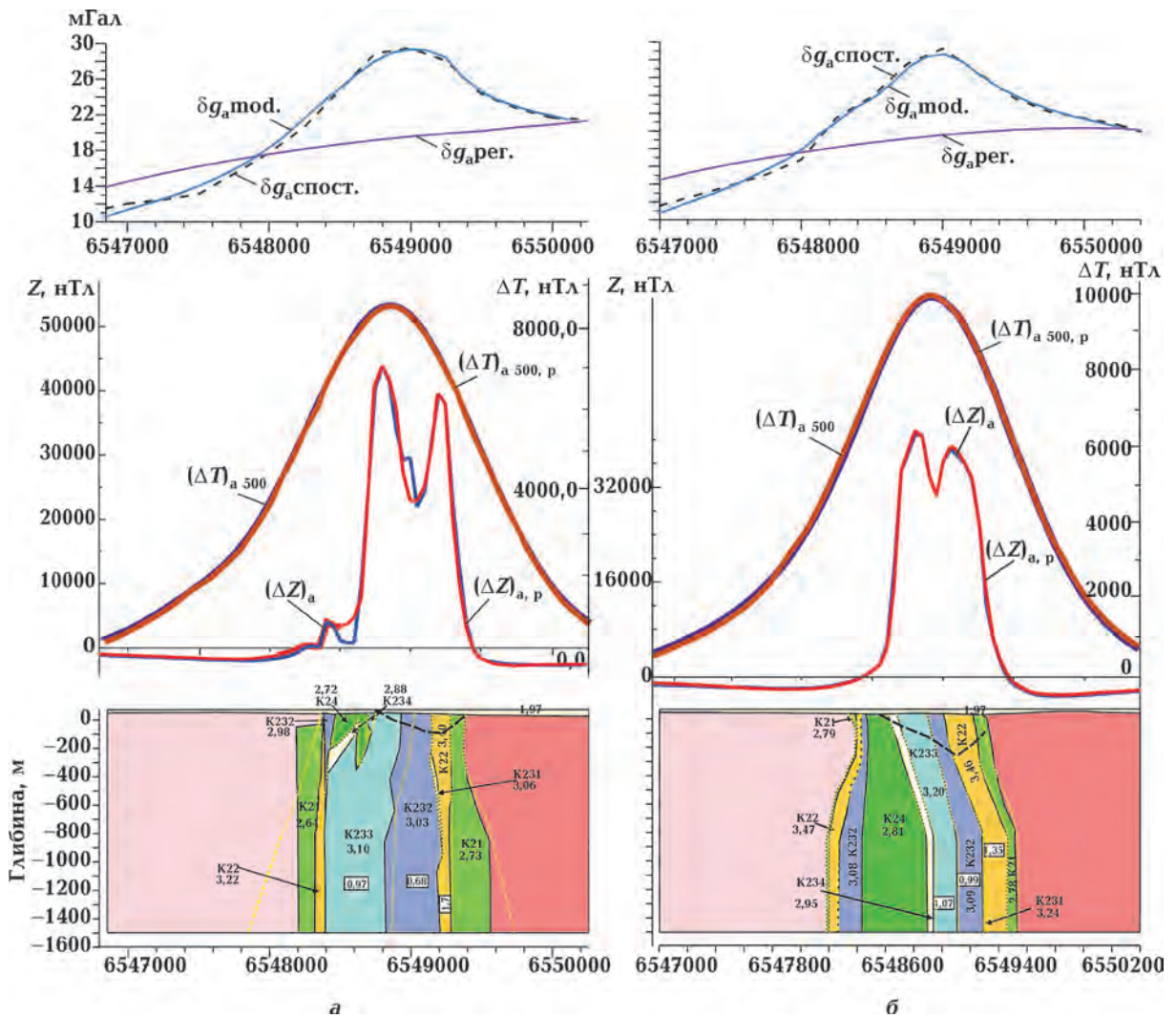


Рис. 9. Узгоджені моделі розрізів уздовж профілів 5 (а) і 8 (б). Межі магнітних джерел зображені суцільною чорною лінією, густинних — жовтою штриховою лінією. Густина порід показана чорними цифрами, магнітна сприйнятливість — чорними цифрами у білих прямокутниках. Чорною штриховою лінією на розрізах виділено верхнє обмеження моделі при розрахунку поля $(\Delta T)_a$ на висоту 500 м.

Fig. 9. Consistent section models along profiles 5 (a) and 8 (b). Magnetic source boundaries are depicted by a solid black line, and density ones are depicted by a yellow dotted line. Rock density is shown by black numbers, magnetic susceptibility is shown by black numbers in white rectangles. The upper limit of the model when calculating the $(\Delta T)_a$ field at 500 m in height is highlighted by black dotted line on the sections.

Обговорення результатів дослідження та висновки. Аналіз комплексу геолого-геофізичних досліджень дає змогу зробити певні висновки щодо структурно-морфологічних особливостей глибинної будови ГПС та методичні й геологічні узагальнення.

Залізородні структури УЩ унаслідок аномально високої геофізичної контрастності рудних магнетитових покладів є найсприятливішими об'єктами для їх структурно-мор-

фологічного моделювання гравімагнітними методами. Застосування при цьому сучасного програмного забезпечення, нарівні із всебічним аналізом наявної геологічної інформації, дають змогу віднести отримані у такий спосіб геологічні побудови до результатів високого ступеня надійності.

Для більшої частини ГПС, за винятком її крайньої південної частини (пр. 2—4), до глибини 400—800 м встановлено східне па-

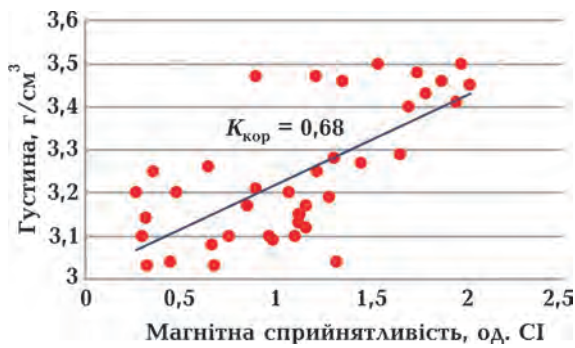


Рис. 10. Графік кореляційного зв'язку розрахованих значень густини та магнітної сприйнятливості порід горизонту K_2^2 , $K_{2,2}^3$ та $K_{2,3}^3$.

Fig. 10. Diagram of correlation connection of calculated values of density and magnetic susceptibility of rocks of horizons K_2^2 , $K_{2,2}^3$ and $K_{2,3}^3$.

діння товщі K_2^2 під кутами не менш як $70-60^\circ$ з подальшим його переходом на субвертикальне. У північній частині структури вирізняється блок перерізів (пр. 12—15) із субвертикальним падінням усієї товщі порід на повну глибину їх поширення.

За винятком південної частини структури, виявлено приблизно витриману, з тенденцією збільшення у північному напрямку, глибину поширення залізовмісних товщ на рівні 1500—2000 м, яка супроводжується невеликими ундуляціями положення їх нижніх обмежень. Різкий перехід від глибини нижнього обмеження ~ 1000 м на профілі 4 до ~ 1500 м на профілі 5, можливо, пов'язаний з існуванням між цими профілями розлому, по якому могло б відбутися субвертикальне переміщення частин структури одна відносно одної (найімовірніше, підняття південної частини) або засвідчує різку крутість цього переходу.

Наведені розрахунки глибини нижніх обмежень залізовмісних шарів оцінено як мінімально можливі. Їх подальше аналітичне продовження в нижній півпростір за заданих параметрів товщини вже не відображається ні у формі, ні в амплітуді аномалій магнітного і гравітаційного полів.

За результатами гравітаційного моделювання основного рудного покладу K_2^2 для ліній перетинів 2—4, 7, 14 виявлено зменшення параметра густини ($3,25-3,30$ г/см³) на фоні модальних значень для цих утворень $3,40-3,60$ г/см³, що можливо пояснити збільшеним внеском у загальний параметр густини шару K_2^2 на цьому відрізку його менш густинних прошарків, які окремо не відображаються у полі сили тяжіння.

Параметр магнітної сприйнятливості характеризується прямим зв'язком із вмістом феромагнітних мінералів у межах покладу K_2^2 майже уздовж усього простягання Горішне-Плавнинської смуги магнітних аномалій (для перетинів 2—4 не визначали) він повністю відповідає межах модальних значень для промислових суттєво магнетитових руд ($1,5-2,5$ од. СІ). Винятком з цієї закономірності є результати магнітного моделювання уздовж перерізу 13, де за збереження високої густини шару K_2^2 ($3,47$ г/см³) параметр магнітної сприйнятливості зменшується до $0,9$ од. СІ. Це може вказувати на певне зменшення вмісту магнетиту в шарі K_2^2 на цьому відрізку за стабільно стійкої густини. Симптоматично, що переріз 13, як і згаданий вище переріз 14, знаходиться у центральній зоні можливо тектонічно обумовленого пережиму двох основних (південного і північного) локальних максимумів магнітного поля.

Вказані морфологічні особливості будови ГПС, на наш погляд, однозначно засвідчують її первинне формування у вигляді прирозломної смуги осадових вулканогенних та екструзивних утворень субвертикального залягання. Спостережені відхилення від її первинного положення є результатом пізніших тектонічних процесів переважно зсувного характеру. На теперішній час це типова правозсувна складка волочіння з яскраво виявленим підвертанням своєї південної частини (аналогі — Лихманівська структу-

Рис. 11. Узагальнена блок-схема будови Горішне-Плавнинської структури за результатами магнітного та гравітаційного моделювання, на якій наведено карти аномалій Буге та аномального магнітного поля, а також модельні розрізи вздовж розглянутих профілів: 1 — контури магнітних (чорні лінії) та густинних (жовта штрихова лінія) джерел; 2 — значення густини, г/см³; 3 — значення магнітної сприйнятливості, од. СІ; 4 — верхня межа магнітних джерел у сучасному рельєфі кар'єру.

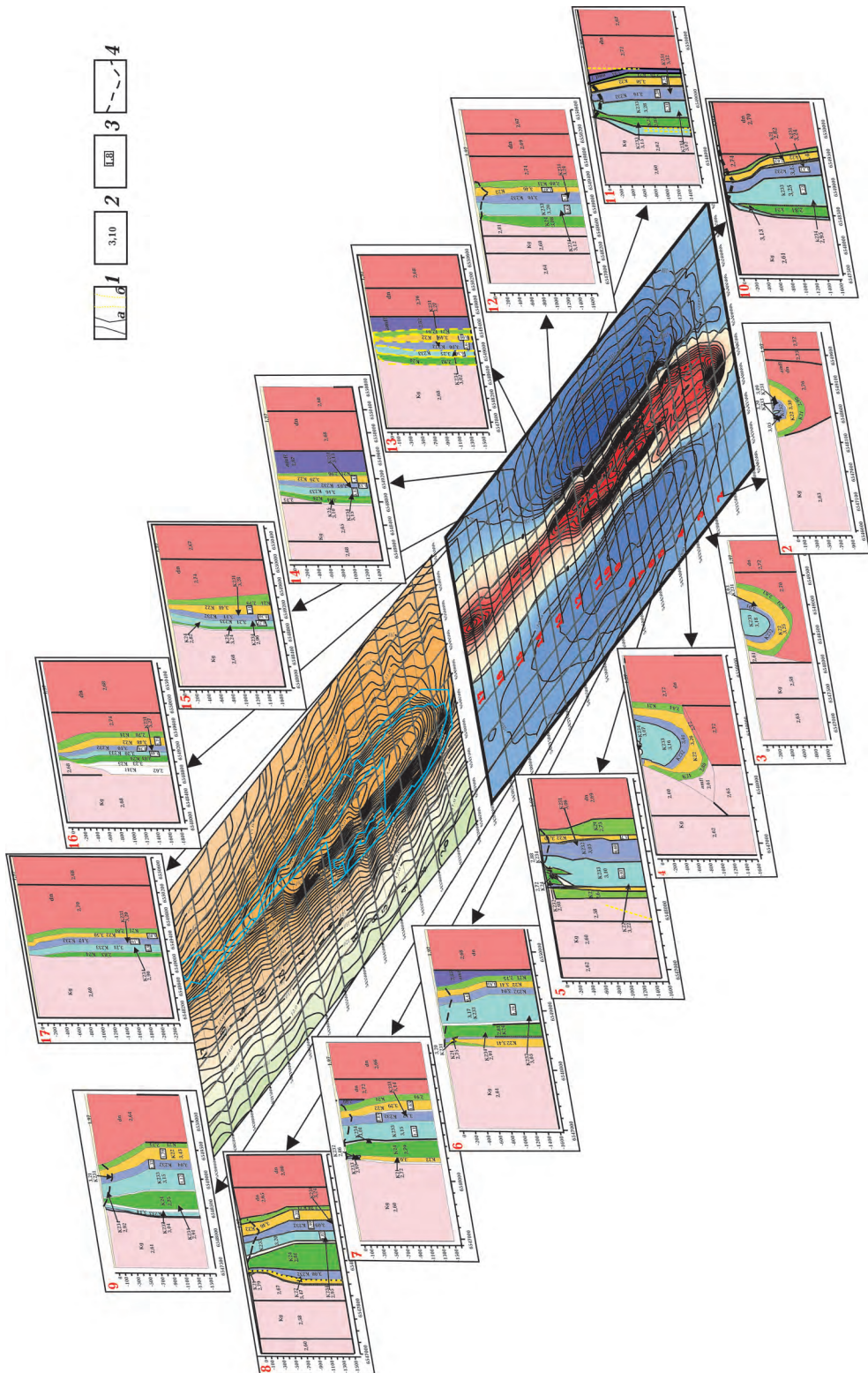


Fig. 11. Generalized block-diagram of the structure of the Gorishne-Plavnik structure based on the results of magnetic and gravity modeling, which shows maps of Bouguer anomalies and anomalous magnetic field, as well as model sections along the considered profiles: 1 — contours of magnetic (black lines) and density (yellow dotted line) sources; 2 — values of density in g/cm^3 ; 3 — values of magnetic susceptibility, units CI; 4 — upper boundary of magnetic sources in the present relief of the quarry.

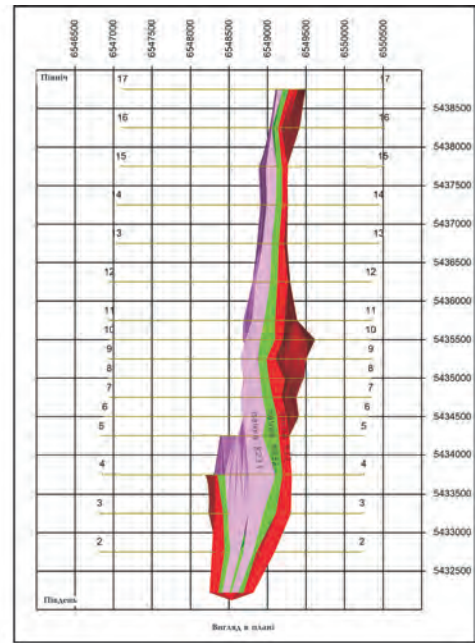
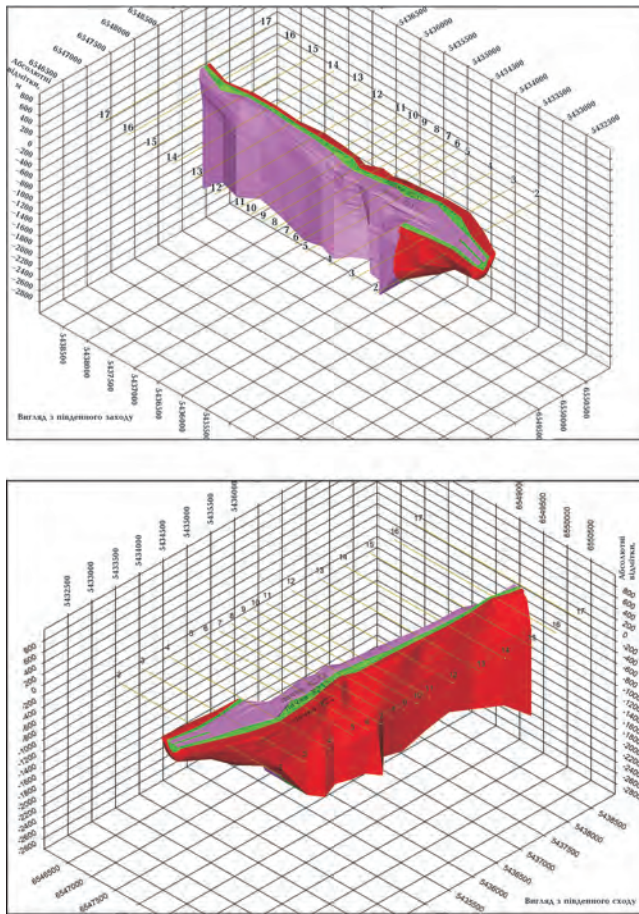


Рис. 12. Каркасна тривимірна модель східного крила Горішне-Плавнинської структури (за результатами гравімагнітного моделювання).

Fig. 12. Frame three-dimensional model of the eastern wing of the Gorishne-Plavninsk structure (based on the results of gravimagnetic modeling).

ра у крайовій південній частині Криворізької смуги магнітних аномалій; Секретарська, Грушківська та інші залізородні структури Середнього Побужжя). Значне поширення в межах УЩ залізородних структур з подібними структурно-морфологічними і кінематичними параметрами дають підставу зробити висновок щодо загальності їх генезису і подальшого структурно-тектонічного становлення. До речі, прирозломні залізородні утворення вулканогенного і метасоматичного генезису встановлені в багатьох районах світу, зокрема в Перу, Чілі, Швеції, Китаї, Росії [Єнтин и др., 2015; Bastani et al., 2019; Lanza, Meloni, 2006 та ін.]. У такому розумінні загальні принципи геолого-геофізичного вивчення ГПС і одержані при цьому результати можуть стати еталонними для УЩ, і насамперед Криворізько-Кременчуцької залізородної смуги. Можливо, в цьому відношенні дрібний поділ залізородних порід криворізької серії ГПС на окремі

світи і підсвіти більш доцільно називати товщами. Беручи до уваги, що побудова моделі Горішне-Плавнинської залізородної структури за широким комплексом геолого-геофізичних даних в умовах діючого кар'єру є неординарним прикладом, то, не зважаючи на відмічену високу геологічну надійність виконаних побудов, на майбутнє доцільно не лише вдосконалювати методичні й технологічні засади виконання подібних робіт, а й, на наш погляд, слід звернути увагу і на деякі негативні обставини, які супроводжували ці дослідження.

Так, у разі великого обсягу геологічних даних, отриманих за результатами гірничих робіт і буріння підвищився ступінь верифікації геологічної моделі першого наближення. Проте якість здобутої інформації залежно від засобу її отримання (кар'єрні виробки, буріння похилих чи вертикальних свердловин, щільність їх розташування та ін.) не є рівнозначною.

Широкий спектр існуючих й одержаних у процесі моделювання вихідних даних (наземної і повітряної магніторозвідки з визначенням різних складових магнітного поля Землі до і після початку гірничих робіт, гравірознавчої) потребує задіяти для їх обробки, інтерпретації та візуалізації різнопланових графічних побудов розширений набір програмного забезпечення і наявність широкого кола кваліфікованих фахівців відповідного профілю.

Додаткову неоднозначність в отриманні результату інтерпретації вносять необхідні, але математично точно не обґрунтовані операції з уведення поправок за виїняті магнітні маси залізної руди і нагромаджені відвали. В умовах діючого кар'єру відсутня можливість, у разі потреби, проведення допоміжних деталізаційних (інтерпретаційних) профільних, тим більше площових, геофізичних спостережень. Відбір зразків гірських порід на визначення фізичних властивостей також обмежений вимогами техніки безпеки у діючому кар'єрі.

Тому при проектуванні майбутніх досліджень подібного напрямку оптимальним бу-

ло б розпочинати їх ще до широкого розгортання гірничодобувних робіт з подальшим системним корегуванням первинної моделі об'єкта вивчення. Такими об'єктами першої черги, крім перспективних, до промислового освоєння нових ділянок Криворізько-Кременчуцької смуги магнітних аномалій могли б також стати деякі магнетитові і карбонат-магнетитові рудопрояви Середнього Побужжя, на яких виконано доволі значний обсяг пошуково-розвідувального буріння (Молдовський, Савранський, Байбузівський та ін.). Створені (і візуалізовані) відносно дешевим камеральним шляхом тривимірні структурно-морфологічні моделі можуть значно підвищити комерційну привабливість таких об'єктів.

Автори статті вдячні компанії Феррекспо за можливість провести масштабне геолого-геофізичне вивчення і організацію робіт у кар'єрі ПрАТ «Полтавський ГЗК». Щира подяка директорові Інституту геофізики НАН України академіку Старостенко Віталію Івановичу за цінні методичні поради стосовно технології комплексного геолого-геофізичного моделювання Горішнє-Плавнинської структури.

Список літератури

- Безродный А.В. Отчет Онуфриевской геофизпартии за 1963 г.
- Белевцев Я.Н., Веригин М.И., Сологуб В.Б. Новый этап геологических исследований Криворожского бассейна. *Геол. журн.* 1980. Т. 40. № 1. С. 1—11.
- Богатырев В.Ф., Ионис Г.И., Ентин В.А. Отчет о поисках карбонатно-магнетитовых и богатых магнетитовых руд в Среднем Побужье, выполненных Ульяновской геологоразведочной партией в 1976—1981 гг. Т. 1. Киев, Геолфонды, 1981. 321 с.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Ентин В.А., Исая В.М. Новые данные об особенностях формирования складчатой структуры магнетитовых месторождений Среднего Побужья. *Докл. АН УССР. Сер. Б.* 1985. № 4. С. 15—17.
- Гинтов О.Б., Исая В.М., Коваленко В.Н. Тектонофизические данные о механизме формирования складок первого порядка Криворожского бассейна на примере Лихмановской структуры. *Геол. журн.* 1990. № 5. С. 115—123.
- Горяинов П.М., Никитин И.В., Николаев А.П., Голиков Н.Н., Извеков О.Э., Балабонин Н.Л. Кировогорское месторождение железистых кварцитов (Кольский полуостров) и его роль в понимании формационных особенностей гнейсо-железорудных комплексов региона. В кн.: Геология и генезис железорудных месторождений раннего докембрия. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1988. С. 5—17.

- Гузій М.І. Магнітна анізотропія докембрійських гранітоїдів (на прикладі Середньопридніпровського блока Українського щита): Дис. ... канд. геол. наук. Київ, 1999. 137 с.
- Доброхотов М.Н., Гинтов О.Б., Ентин В.А., Солонина И.Н. Обобщение и переинтерпретация геолого-геофизических материалов по Украинскому щиту для определения участков, перспективных на железо: отчет. Кн. 1. Киев, Геолфонд, 1971. 412 с.
- Ентин В.А. Геолого-структурные особенности и прогнозная оценка ресурсов железорудных месторождений Среднего Побужья: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 1987. 207 с.
- Ентин В.А., Гинтов О.Б., Мычак С.В., Юшин А.А. Структура Молдовского железорудного месторождения (Украинский щит) по геолого-геофизическим данным и его возможная эндогенная природа. *Геофиз. журн.* Т. 37. 2015. № 4. С. 3—18. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111118>.
- Завойский В.Н. Использование вектора магнитной восприимчивости для решения задач структурной геологии. *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1982. № 3. С. 76—84.
- Завойский В.Н. Определение ориентации текстурного эллипсоида пород с помощью необратимой магнитной восприимчивости. *Докл. АН УССР. Сер. Б.* 1979. № 10. С. 798—808.
- Завойський В.М., Іващенко І.М., Неїжсал Ю.Є. Оцінка положення нижньої кромки Криворізької структури по магнітній аномалії. *Геофиз. журн.* 1992. Т. 14. № 2. С. 71—75.
- Ионис Г.И., Ентин В.А., Гринин Р.И. Отчет по поисково-оценочным работам на Молдовском железорудном месторождении 1981—1986 гг. Т. 1. Киев, Геолфонды, 1986. 152 с.
- Каневский А.Я., Гинтов О.Б. Находка новой разновидности железных руд на Украинском щите в районе Побужья. *Геол. журн.* 1972. Т. 32. Вып. 5. С. 140—141.
- Карта аномального магнитного поля. 1 : 50 000. Под ред. В.Ю. Ищенко. Киев: ГП «УГК», 1982.
- Коваленко-Завойський В.М., Іващенко І.М. Математичне забезпечення інтерпретації поля регіональних магнітних аномалій. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 18—30.
- Котченко А.А. Результаты геофизических исследований на Белановском участке Кременчугского железорудного района. Отчет Левобережной геофизической партии 266/71. 1971.
- Криворожская сверхглубокая скважина СГ-8. Под ред. Е.М. Шеремета. Донецк: Ноулидж, 2011. 555 с.
- Крутиховская З.А. Глубинное строение и прогнозная оценка Украинской железорудной провинции (по данным гравиметрических и магнитометрических исследований): Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1977.
- Крутиховская З.А. Отчет Кременчугской геофизической партии о геофизических работах, выполненных в 1945 г. в южной части Кременчугской магнитной аномалии. Киев: Фонды УТГФ, 1946.
- Крутиховская З.А. Отчет о геофизических работах Кременчугской геофизической партии за 1952—1953 гг. (Еристовский, 100 × 40—20 м; Галецинский 100 × 50 м; Северный, 300 × 60 м; Броваркивские участки Кременчугской магнитной полосы).
- Крутиховская З.А., Пашкевич И.К., Чирвинская М.В. Криворожско-Кременчугский глубинный разлом. *Геофиз. сб. АН УССР.* 1969. Вып. 32. С. 18—27.
- Крутиховская З.А., Силина И.М., Завойский В.Н. и др. Структура фундамента и железорудные месторождения северного склона Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1975. 242 с.
- Крутиховская З.А., Старостенко В.И., Гарбуза А.А. О построении структурных карт подошвы криворожской и метабазитовой се-

- рий по гравиметрическим данным путем моделирования. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1972. Вып. 45. С. 67—72.
- Миллер Г.Г. Результаты детальных геофизических исследований на Васильковском участке Кременчугского рудного бассейна. Левобережная г/п 266/72. Криворожская ГЭ. Трест «Днепрогеофизика», 1972.
- Миллер Г.Г. Результаты комплексных геофизических исследований на Северо-Васильевском (Кременчугский железорудный район) и Северо-Артемовском (Правобережный район) участках. Левобережная г/п 266/73. Криворожская ГЭ. Трест «Днепрогеофизика», 1973.
- Моль Н.Н., Шмарьян С.А. Результаты опытных работ методом ВП, выполненных на Горишне-Плавнинском, Паньковском, Комендантовском и Карповском участках Кременчугского горно-рудного района. Фонды ДП «УГК», 1968.
- Муди Дж.Д., Хилл Дж.М. Сдвиговая тектоника. В кн.: Вопросы современной зарубежной тектоники. Москва: Изд-во иностр. лит, 1960. С. 265—333.
- Орлюк М.И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М.И., Коваленко-Завойский В.Н., Иващенко И.Н., Марченко А.В. Математическое и программно-алгоритмическое представления и интерпретации региональных магнитных аномалий с учетом сферичности Земли. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 35-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского (29 января—3 февраля 2008 г., Ухта)*. Сыктывкар, 2008. С. 123—234.
- Орлюк М.И., Марченко А.В., Бакаржієва М.І. Курська магнітна аномалія: аналіз аномального магнітного поля за даними наземних, стратосферних та супутникових зйомок. В сб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Київ, 2013. С. 107—116.
- Орлюк М.И., Пашкевич И.К., Бурахович Т.К., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Цветкова Т.А. Глубинное строение территории Украины по современным геофизическим данным. Украинский щит. В кн.: *Очерки геодинамики Украины*. Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: Изд. ВІ ЕН ЕЙ, 2018. С. 24—36.
- Пашкевич И.К., Орлюк М.И., Елисеєва С.В., Бакаржієва М.И., Лебедь Т.В., Роменец А.А. 3D магнитная модель земной коры Украинского щита и его петролого-тектоническая интерпретация. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 7—18.
- Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978. 228 с.
- Старостенко В.И., Гинтов О.Б., Пашкевич И.К., Бурахович Т.К., Кулик С.Н., Куприенко П.Я., Кутас Р.И., Макаренко И.Б., Орлюк М.И., Цветкова Т.Л. Закономерности размещения месторождений рудных полезных ископаемых в связи с глубинным строением и динамикой литосферы Украинского щита. *Связь поверхностных и глубинных структур земной коры. Материалы 14-й Международной конференции*. Ч. 2. Петрозаводск: Изд. Карельского научного центра РАН, 2008. С. 226—229.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Савченко А.С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-auto). *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52.
- Тяпкін К.Ф. Про сдвигу тектоніку в межах Криворіжжя. *Докл. АН УССР. Сер. Б.* 1965. № 4. С. 96—99.
- Тяпкин К.Ф., Беланов В.М., Козубская Г.Н., Нечаев В.А., Распопова М.Г., Харитонов В.Д. Структурные особенности земной коры Украинского щита и связь с ними оруденений. В кн.: *Связь поверхностных структур зем-*

- ной коры с глубинными. Киев: Наук. думка, 1971. С. 130—136.
- Хаин В.Е., Михайлов А.Е. Общая геотектоника. Москва: Недра, 1985. 326 с.
- Черновский М.И. О природе Саксаганской синклинали. В кн.: Перспективы развития богатых железных руд Криворожского бассейна на глубину. Киев: Наук. думка, 1975. С. 75—76.
- Шаган Л.П и др. Результаты комплексных геофизических работ, выполненных в северной части планшета М-36-104-АиБ и на Белановском участке Кременчугской группы магнитных аномалий. Фонды ДП «УГК», 1972.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.
- Bastani, M., Sadeghi, M., Malehmir, A., Luth, S., & Marsden, P. (2019). 3D magnetic susceptibility model of a deep iron-oxide apatite-bearing-ore body incorporating borehole data in Blötberget, Sweden. *Extended Abstracts 16th SAGA Biennial Conference & Exhibition* (pp. 1—4).
- Borradaile, G.J., & Jackson, M. (2010). Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *Journal of Structural Geology*, 32(10), 1519—1551. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.09.006>.
- DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1945—2024 and Related Parameters. (2020). Retrieved from https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php.
- Geophysical Software Solutions. Potent. (2021). Retrieved from <https://www.geoss.com.au/potent.html>.
- Jelínek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabrics of rocks. *Tectonophysics*, 79(3-4), T63—T67. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90110-4).
- Jelínek, V. (1977). *The Statistical Theory of Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Rocks and its Application*. Printed in Geofyzika Brno.
- Kerr, T.L., O'Sullivan, A.P., Podmore, D.C., Turner, R., & Waters, P. (1994). IRON: Geophysics and iron-ore exploration: examples from the Jimblebar and Shay Gap-Yarrie regions, Western Australia. *Exploration Geophysics*, 25(3), 169—170. <https://doi.org/10.1071/EG994169b>.
- Lanza, R., & Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologists*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 278 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27980-8>.
- Liu, S., Fedi, M., Hu, X., Ou, Y., Baniamerian, J., Zuo, B., Liu, Y., & Zhu, R. (2018). Three-dimensional inversion of magnetic data in the simultaneous presence of significant remanent magnetization and self-demagnetization: example from Daye iron-ore deposit, Hubei province, China. *Geophysical Journal International*, 215(1), 614—634. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy299>.
- Oyedele, K., Oladele, S., & Salami, A. (2016). Geophysical investigation of banded iron-ore mineralization at Ero, North—Central Nigeria. *Materials and Geoenvironment*, 63(2), 109—118. <https://doi.org/10.1515/rmzmag-2016-0010>.
- Tarling, D.H., & Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rock*. London: Chapman & Hall, 217 p.
- Tauxe, L. (2005). *Lectures in Paleomagnetism*. Retrieved from http://palaeo.spb.ru/pmlibrary/pmbooks/tauxe_2005_lectures.pdf.

Depth structure of the Gorishne-Plavninsk structure and general principles of geological and geophysical study of the Krivoy Rog-Kremenchug iron-ore strip

V.A. Entin¹, M.I. Orlyuk², O.I. Belous³, O.B. Gintov², V.G. Malakhov¹, V.G. Bakhmutov², I.A. Kachan¹, M.I. Bakarzhieva², I.B. Makarenko², O.S. Savchenko², T.M. Samoilenko¹, A.V. Marchenko², V.V. Drukarenko², I.B. Poliachenko², S.V. Mychak², A.O. Romenets², O.V. Braiko⁴, 2021

¹State Enterprise «Ukrainian Geological Company», Kyiv, Ukraine

²S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Ferrexpo Service Partnership, Kyiv, Ukraine

⁴Ferrexpo Poltava mining, Horishni Plavni, Ukraine

The article presents the results of the newest research performed by the State Enterprise «Ukrainian Geological Company» and the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2021 to find out the morphology and elements of occurrence of an redeposit within the limits of the Gorishne-Plavninsk-Lavrikovsk area of the Krivoy Rog-Kremenchug iron-ore strip. In the process of geological and geophysical studies, a large body of new geological and geophysical data was obtained regarding the deep structural and morphological features of the construction of the Gorishne-Plavninsk structure (GPS), associated with the Krivoy-Rog deep fracture zone.

Materials of reinterpretation of previously performed ground-based magnetometric and gravimetric surveys, detailed high-altitude aeromagnetic studies and the study of the density and magnetic properties of the structure rocks, including the anisotropy of magnetic susceptibility using new equipment and techniques, gravimagnetic modeling with the construction of three-dimensional volume model of the structure lead to the conclusion that this structure is a typical drag fold with a pronounced reversal of its southern part by the right-hands hear. Its primary formation occurred as a faulted band of sedimentary-volcanogenic and extrusive formations of subvertical bedding and spreading to a depth of at least 1.5—2 km.

A complete morphological and kinematic analogue of the GPS is the previously studied Likhmanovsk structure, located in the most southern part of the Krivoy Rog-Kremenchug strip. Iron-ore structures of the Middle Bug area are close to it in structure and kinematics, the primary subvertical faulting and doubtful sedimentary genesis were mentioned earlier. All these data require a new approach to the study of iron-ore and some other deposits of the Ukrainian Shield associated with fault tectonics, as well as to the genesis problems and stratigraphy of rocks of the Early Precambrian.

Key words: Ukraine, iron-ore deposit, geophysical methods, anisotropy tensor, magnetic and gravity model, shear tectonics, monoclinial.

References

- Bezrodnnyy, A.V. (1963). *Report of Onufriev geophysical party of 1963* (in Russian).
- Belevtsev, Ya.N., Verigin, M.I., & Sollogub, V.B. (1980). A New Stage of Geological Investigations of Krivoy Rog Basin. *Geologicheskii Zhurnal*, 40(1), 1—11 (in Russian).
- Bogatyrev, V.F., Ionis, G.I., & Entin, V.A. (1981). *Report on the search of carbonate-magnetite and rich magnetite ores in the Middle Bug area, performed by the Ulyanovsk Geological Exploration Party in 1976—1981*. Vol. 1. Kiev, Geofunds, 321 p. (in Russian).

- Gintov, O.B. (2005). *Field Tectonophysics*. Kiev: Feniks, 572 p. (in Russian).
- Gintov, O.B., & Entin, V.A., & Isay, V.M. (1985). New data on the features of formation of the folded structure of magnetite deposits of the Middle Bug area. *Doklady AN USSR. Ser. B*, (4), 15—17 (in Russian).
- Gintov, O.B., Isay, V.M., & Kovalenko, V.N. (1990). Tectonophysical data on the formation mechanism of the First Order Folds of Krivoy Rog Basin by the example of Likhmanovska Structure. *Geologicheskij Zhurnal*, (5), 115—123 (in Russian).
- Goryainov, P.M., Nikitin, I.V., Nikolaev, A.P., Golikov, N.N., Izvekov, O.E., & Balabonin, N.L. (1988). The Kirovogorsk iron quartzite deposit (Kola Peninsula) and its role in understanding the formation features of gneiss-iron-ore complexes of the region. In *Geology and Genesis of Early Precambrian Iron-Ore Deposits* (pp. 5—17). Apatites: Publishing House of the Kola branch of the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Guziy, M.I. (1999). Magnetic Anisotropy of Precambrian Granitoids (for Serednyoprydniprovsk block of the Ukrainian Shield). *Candidate's thesis*. Kyiv, 137 p. (in Ukrainian).
- Dobrokhoto, M.N., Gintov, O.B., Entin, V.A., & Solonina, I.N. (1971). *Generalization and reinterpretation of geological and geophysical materials on the Ukrainian Shield to determine areas promising for iron: Report*. Book 1. Kiev, Geolfund, 412 p. (in Russian).
- Entin, V.A. (1987). Geological and structural peculiarities and predicted evaluation of resources of iron-ore deposits of the Middle Bug area. *Candidate's thesis*, 207 p. (in Russian).
- Entin, V.A., Gintov, O.B., Myschak, S.V., & Yushin, A.A. (2015). The structure of the Moldovan iron-ore deposit (The Ukrainian Shield) according to geological-geophysical data and its possible endogenous nature. *Geofizicheskij Zhurnal*, 37(4), 3—18. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111118> (in Russian).
- Zavoyskiy, V.N. (1982). Using of magnetic susceptibility vector to solve problems of structural geology. Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (3), 76—84 (in Russian).
- Zavoyskiy, V.N. (1979). Determination of orientation of textural ellipsoid of rocks with the help of irreversible magnetic susceptibility. *Doklady AN USSR. Ser. B*, (10), 798—808 (in Russian).
- Zavoyskiy, V.M., Ivashchenko, I.M., & Neyizhsal, Yu.Ye. (1992). Evaluation of the lower edge position of the Krivoy Rog structure by magnetic anomaly. *Geofizicheskij Zhurnal*, 14(2), 71—75 (in Ukrainian).
- Ionis, G.I., Entin, V.A., & Grinin, R.I. (1986). Report on Prospecting and Evaluation Works at the Moldovan Gold Mine in 1981—1986. Vol. 1. Kiev, Geol funds, 152 p. (in Russian).
- Kanevskiy, A.Ya., & Gintov, O.B. (1972). Finding of new type of iron-ore in Ukrainian Shield in the Bug area. *Geologicheskij Zhurnal*, 32(5), 140—141 (in Russian).
- Ischenko, V.Yu. (Ed.). (1982). *Map of the anomalous magnetic field. 1 : 50 000*. Kiev: GP «UGK» (in Russian).
- Kovalenko-Zavoyskiy, V.M., & Ivashchenko, I.M. (2006). Mathematical Support for Interpretation of the Field of Regional Magnetic Anomalies. *Geofizicheskij Zhurnal*, 28(5), 18—30 (in Russian).
- Kotchenko, A.A. (1971). *The results of geophysical research on the Belanovsk area of the Kremenchug iron-ore district (report of Levoberezhna geophysical party 266/71)* (in Russian).
- Sheremet, E.M. (Ed.). (2011). *Krivoy Rog super-deep well SG-8*. Donetsk: Noulidzh, 555 p. (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A. (1977). Deep structure and predictive estimate of the Ukrainian iron-ore province (based on gravimetric and magnetometric studies). *Doctor's thesis*. Kiev (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A. (1946). *Report of the Kremenchug geophysical party on geophysical works carried out in 1945 in the southern part of the Kremenchug magnetic anomaly*. Kiev, Funds of the UTGF (in Russian).

- Krutikhovskaya, Z.A. (1953). *Report on the geophysical works of the Kremenchug geophysical party for 1952—1953* (Yeristovsky, 100 × 40 × 20 m; Galeshchinsky 100 × 50 m; Northern, 300 × 60 m; Brovarkivsky sections of the Kremenchug magnetic strip) (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A., Pashkevich, I.K., & Chirvinskaya, M.V. (1969). Krivoy Rog-Kremenchug Depth Fault. *Geofizicheskiy sbornik AN USSR*, (32), 18—27 (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A., Silina, I.M., Zavoyskiy, V.N. et al. (1975). *Structure of the foundation and iron-ore deposits of the Northern slope of the Ukrainian Shield*. Kiev: Naukova Dumka, 242 p. (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A., Starostenko, V.I., & Garbuza, A.A. (1972). On constructing structural maps of the bases of Krivoy Rog and metabasitic series based on Gravimetric data by simulation. *Geofizicheskiy sbornik AN USSR*, (45), 67—72 (in Russian).
- Miller, G.G. (1972). *Results of detailed geophysical studies at the Vasilkovsky section of the Kremenchug ore basin*. Levoberezhna g/p 266/72. Krivoy Rog GE. Dneprogeophysika Trust (in Russian).
- Miller, G.G. (1973). *Results of complex geophysical researches on North-Vasilyevsk (Kremenchug iron-ore district) and North-Artemovsk (Pravoberezhny district) sites*. Levoberezhna g/p 266/73. Krivoy Rog GE. Dneprogeophysika Trust (in Russian).
- Mol, N.N., & Shmarian, S.A. (1968). *The results of experimental works by VP method carried out in Gorishne-Plavninsk, Pankovsk, Komendantovsk Karpovsk areas of Kremenchug mining district*. DP «UGK» funds (in Russian).
- Moody, J.D., & Hill, J.M. (1960). The shift tectonics. In *Questions of modern foreign tectonics* (pp. 265—333). Moscow: Publishing House of Foreign Literature (in Russian).
- Orlyuk, M.I. (2000). Spatial and spatial-temporal magnetic models of different-ranks structures of the continental lithosphere. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk, M.I., Kovalenko-Zavoyskiy, V.N., Ivashchenko, I.N., & Marchenko, A.V. (2008). Mathematical and software-algorithmic representation and interpretation of regional magnetic anomalies, taking into account sphericity of the Earth. *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electrical fields: Proceedings of the 35th session of the International D.G. Uspensky seminar (29 January—3 February 2008, Ukhta)* (pp. 231—234). Syktyvkar (in Russian).
- Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., & Bakarzhieva, M.I. (2013). Kursk magnetic anomaly: Analysis of the anomalous magnetic field by ground, stratospheric and satellite survey. In *Theoretical and applied aspects of geoinformatics* (pp. 107—116) (in Ukrainian).
- Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K., Burakhovich, T.K., Kuprienko, P.Ya., Makarenko, I.B., & Tsvetkova, T.A. (2018). Deep structure of the territory of Ukraine according to present geophysical data. Ukrainian Shield. In V.I. Starostenko, O.B. Gintov (Eds.), *Essays on Geodynamics of Ukraine* (pp. 24—36). Kiev: Publishing House VI EN EY (in Russian).
- Pashkevich, I.K., Orlyuk, M.I., Eliseeva, S.V., Bakarzhieva, M.I., Lebed, T.V., & Romenets, A.A. (2006). 3D magnetic model of the Earth's crust of the Ukrainian Shield and its petrological and tectonic interpretation. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 28(5), 7—18 (in Russian).
- Starostenko, V.I. (1978). *Stable Numerical Methods in Problems of Gravimetry*. Kiev: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Gintov, O.B., Pashkevich, I.K., Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Kuprienko, P.Ya., Kutas, R.I., Makarenko, I.B., Orlyuk, M.I., & Tsvetkova, T.L. (2008). Regularities of ore mineral deposits location in relation to the deep structure and dynamics of the Ukrainian Shield lithosphere. *Connection of surface and deep structures of the Earth's crust. Materials of the 14th International Conference* (pp. 226—229). Petrozavodsk: Publication of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Starostenko, V.I., Legostaeva, O., Makarenko, I., & Savchenko, A. (2015). Software system for automated data interpretation of potential fields (GMT-Auto). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(1), 42—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322> (in Russian).

- Tyapkin, K.F. (1965). Shear Tectonics in the confines of Kryvoy Rog area. *Doklady AN USSR. Ser. B*, (4), 96—99 (in Ukrainian).
- Tyapkin, K.F., Belanov, V.M., Kozubskaya, G.N., Nechaev, V.A., Raspopova, M.G., & Kharitonov, V.D. (1971). Structural features of the Earth's crust of the Ukrainian Shield and associated mineralization zone. In *The relationship between the surface structures of the Earth's crust and the deep ones* (pp. 130—136). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Khain, V.E., & Mikhaylov, A.E. (1985). *General Geotectonics*. Moscow: Nedra, 326 p. (in Russian).
- Chernovskiy, M.I. (1975). On the nature of Saksagan syncline. In *Prospects of development of rich iron-ores of Krivoy Rog basin in depth* (pp. 75—76). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Shagan, L.P. et al. (1972). *Results of Complex Geophysical works in the Northern Part of the M-36-104-AiB Plateau and in the Belanovsky Area of the Kremenchug Magnetic Anomaly Group*. DP «UGK» funds (in Russian).
- Sherman, S.I., Seminskiy, K.J., & Bornyakov, S.A. (1991). *Faulting in the lithosphere. Shear Zones*. Novosibirsk: Nauka, 262 p. (in Russian).
- Bastani, M., Sadeghi, M., Malehmir, A., Luth, S., & Marsden, P. (2019). 3D magnetic susceptibility model of a deep iron-oxide apatite-bearing-ore body incorporating borehole data in Blötberget, Sweden. *Extended Abstracts 16th SAGA Biennial Conference & Exhibition* (pp. 1—4).
- Borradaile, G.J., & Jackson, M. (2010). Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *Journal of Structural Geology*, 32(10), 1519—1551. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.09.006>.
- DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1945—2024 and Related Parameters. (2020). Retrieved from https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php.
- Geophysical Software Solutions. Potent. (2021). Retrieved from <https://www.geoss.com.au/potent.html>.
- Jelínek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabrics of rocks. *Tectonophysics*, 79(3-4), T63—T67. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90110-4).
- Jelínek, V. (1977). *The Statistical Theory of Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Rocks and its Application*. Printed in Geofyzika Brno.
- Kerr, T.L., O'Sullivan, A.P., Podmore, D.C., Turner, R., & Waters, P. (1994). IRON: Geophysics and iron-ore exploration: examples from the Jimblebar and Shay Gap-Yarrie regions, Western Australia. *Exploration Geophysics*, 25(3), 169—170. <https://doi.org/10.1071/EG994169b>.
- Lanza, R., & Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologists*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 278 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27980-8>.
- Liu, S., Fedi, M., Hu, X., Ou, Y., Baniamerian, J., Zuo, B., Liu, Y., & Zhu, R. (2018). Three-dimensional inversion of magnetic data in the simultaneous presence of significant remanent magnetization and self-demagnetization: example from Daye iron-ore deposit, Hubeiprovince, China. *Geophysical Journal International*, 215(1), 614—634. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy299>.
- Oyedele, K., Oladele, S., & Salami, A. (2016). Geophysical investigation of banded iron-ore mineralization at Ero, North—Central Nigeria. *Materials and Geoenvironment*, 63(2), 109—118. <https://doi.org/10.1515/rmzmag-2016-0010>.
- Tarling, D.H., & Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rock*. London: Chapman & Hall, 217 p.
- Tauxe, L. (2005). *Lectures in Paleomagnetism*. Retrieved from http://palaeo.spb.ru/pmlibrary/pmbooks/tauxe_2005_lectures.pdf.

Глубинное строение Горишне-Плавнинской структуры и общие принципы геолого-геофизического изучения Криворожско-Кременчугской железорудной полосы

*В.А. Ентин¹, М.И. Орлюк², А.И. Белоус³, О.Б. Гинтов², В.Г. Малахов¹,
В.Г. Бахмутов², И.А. Качан¹, М.И. Бакаржиева², И.Б. Макаренко²,
А.С. Савченко², Т.М. Самойленко¹, А.В. Марченко², В.В. Друкаренко²,
Е.Б. Поляченко², С.В. Мычак², А.А. Роменец², О.В. Брайко⁴, 2021*

¹Государственное предприятие «Украинская геологическая компания»,
Киев, Украина

²Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

³Товарищество FerrexpoСервис, Украина, Киев

⁴ЧАО «Полтавский ГОК», Горишние Плавни, Украина

В статье изложены результаты новейших исследований, выполненных в 2021 г. Государственным предприятием «Украинская геологическая компания» и Институтом геофизики НАН Украины с целью выяснения морфологии и элементов залегания рудной залежи в пределах Горишне-Плавнинско-Лавриковского участка Криворожско-Кременчугской железорудной полосы. В процессе выполнения геолого-геофизических исследований получен большой массив новых геолого-геофизических данных относительно глубинных структурно-морфологических особенностей строения Горишне-Плавнинской структуры (ГПС), связанной с Криворожской глубинной зоной разломов.

Материалы переинтерпретации выполненных ранее наземных магнитометрических и гравиметрической съемок, проведение детальных повысотных аэромагнитных исследований и изучение плотностных и магнитных свойств горных пород структуры, в том числе анизотропии магнитной восприимчивости, с применением новых аппаратуры и методик, и гравимагнитное моделирование с построением объемной трехмерной модели ГПС приводят к выводу, что эта структура представляет собой типичную складку волочения с ярко проявленным подворачиванием ее южной части по типу правого сдвига. Первичное формирование структуры происходило в виде приразломной полосы осадочно-вулканогенных и экструзивных образований субвертикального залегания и распространения на глубину не менее 1,5—2 км.

Полный морфологический и кинематический аналог ГПС — ранее изученная Лихмановская структура, расположенная в крайней южной части Криворожско-Кременчугской полосы. Близки ей по строению и кинематике также многие железорудные структуры Среднего Побужья, о первичном приразломном субвертикальном залегании и сомнительном осадочном генезисе которых говорилось и ранее. Согласно полученным данным, необходимо по-новому отнестись к изучению железорудных и некоторых других месторождений Украинского щита, связанных с разломной тектоникой, а также к вопросам генезиса и стратиграфии пород раннего докембрия.

Ключевые слова: Украина, железорудные месторождения, геофизические методы, тензор анизотропии, магнитная и гравитационная модели, сдвиговая тектоника, моноклираль.