

# Результати гравітаційного моделювання центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону (Український щит)

*Т.Л. Міхєєва, Г.М. Дрогицька, О.П. Лапіна, 2024*

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 26 вересня 2024 р.

У межах центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону (Український щит) раніше було проведено гравітаційне моделювання Городищенського габро-анортозитового масиву. В процесі удосконалення комп'ютерної технології інтерпретації потенціальних полів було розширено задачу і одночасно проведено тривимірне моделювання не тільки Городищенського, а й Смілянського габро-анортозитового масивів і створено спільну 3D модель верхньої кори цих масивів з використанням карти аномального гравітаційного поля масштабу 1:200 000. Для вибору моделі першого наближення застосовані результати детальних сейсмічних робіт, за допомогою яких було визначено границі цих інтрузивних масивів. Структура анортозит-рапаківігранітної формації та гнейсів, що її оточують, різна, і це відобразилось у сейсмічних хвильових полях. Для поділу порід основного складу та гранітів рапаківі, відмінних за густиною, було виконано тривимірне гравітаційне моделювання з використанням комп'ютерної технології автоматизованої інтерпретації геофізичних даних на підставі методу підбору. Для параметризації геологічних джерел запропоновано апроксимаційну конструкцію, яка представлена набором тривимірних стрижневих тіл.

У ході розв'язання оберненої задачі здійснено різні критерії локальної оптимізації джерел гравітаційного поля за допомогою різних функціоналів. На великій кількості спостережених даних гравітаційного поля було доведено, що їх спільне використання значно зменшує кількість шумів у вхідних даних і, отже, забезпечує точність розрахунків. Дослідження також показало, що застосування різних функціоналів оптимізації в методах підбору є виправданим.

Тривимірне гравітаційне моделювання дало можливість виділити і оконтурити у верхній частині розрізу тіла габро-анортозитів з максимальною товщиною до 4–5 км, уточнити форму та розміри гранітів рапаківі, вивчити контакти інтрузивного комплексу з гнейсами, що його оточують. Створену тривимірну модель, яка враховує всю доступну апіорну інформацію про густину та геометричні параметри аномалієзбурювальних джерел, можна використовувати для отримання додаткової достовірної інформації про геологічної будову Городищенського та Смілянського габро-анортозитових масивів.

Надійність роботи даного тривимірного алгоритму гравітаційного підбору з використанням апроксимаційної моделі у вигляді тристрижневої конструкції за значного обсягу спостережених даних дає можливість рекомендувати його для вивчення аналогічних габро-анортозитових масивів Українського щита, передусім Коростенського плутону.

**Ключові слова:** Український щит, Корсунь-Новомиргородський плутон, габро-анортозитовий масив, верхня кора, тривимірне гравітаційне моделювання, обернена задача, метод підбору.

---

Citation: Mikheeva, T.L., Drogytska, G.M., & Lapina, O.P. (2024). Results of gravity modeling of the central part of the Korsun-Novomyrhorod pluton (Ukrainian Shield). *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(6), 120–135. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i6.312203>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

**Вступ.** Дослідження глибинної будови складних багатозонних аноксидно-рапаківігранітних плутонів необхідні для пошуку можливих шляхів вирішення цілого ряду проблем: з'ясування причин появи цього комплексу на одній із стадій еволюції земної кори в докембрії на всіх континентах; генезис гранітів рапаківі та основних порід (магматична кристалізація або метасоматичні процеси); визначення механізму формування плутонів і тектонічних умов їх становлення. Крім того, це має і практичне значення, оскільки з габроїдами просторово та генетично пов'язані промислові родовища та рудопрояви олова, берилію, літію, вольфраму, титану, ванадію, скандію, фосфору, п'єзокварцевої сировини, дорогоцінного та декоративного каміння.

Ця стаття є продовженням публікації [Міхєєва та ін., 2023], в якій наведено геологічно-тектонічну схему, що показує положення плутону та його основних масивів, і зроблено першу спробу застосування тривимірного алгоритму гравітаційного підбору з використанням апроксимаційної моделі у вигляді тристрижневої конструкції на реальному геологічному матеріалі. Городищенський габро-анортозитовий масив Корсунь-Новомиргородського плутону обрано не випадково. Масив докладно вивчено як геологічними, так і геофізичними методами. У районі західного його контакту проведено детальні сейсмічні спостереження, що дали змогу визначити межі всього інтрузиву, включаючи граніти рапаківі та породи основного складу. Ці комплекси відрізняються за густиною. Для їх розділення було проведено гравітаційне моделювання, результатом якого стало виділення тіл габро-анортозитів у верхній частині розрізу, уточнення геометричних параметрів гранітів рапаківі, вивчення контактів інтрузивного комплексу з гнейсами, що його вміщують.

У цій статті розширено район досліджень — 25×38 км і виконано тривимірне гравітаційне моделювання Городищенського та Смілянського габро-анортозитових масивів, на межі яких розташоване Носачівське титано-ільменітове родовище, єдине тако-

го типу в Корсунь-Новомиргородському плутоні. Воно розташоване в центральній його частині в межах західного відгалуження від Смілянського аноксидно-рапаківігранітного масиву. Породами для вмісних рудних тіл є аноксидити і габро-анортозити.

Детальні сейсмічні дослідження в районі західного контакту плутону (Городищенський габро-анортозитовий масив) стали основою для побудови моделі першого наближення і в районі Смілянського масиву, що знаходиться на східному контакті плутону.

**Геолого-геофізична вивченість габро-анортозитових масивів центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону.** Корсунь-Новомиргородський плутон гранітів рапаківі та габро-анортозитів площею 7800 км<sup>2</sup> розташований у центральній частині Українського щита і є складним багатозонним інтрузивним тілом, яке прориває гнейси та мігматити нижньопротерозойської метаморфічної інгуло-інгулецької серії та гранітоїди новоукраїнського комплексу одного з нею віку. Формування плутону відбувалося за умов консолідованої платформи. Він складений породами аноксидит-рапаківігранітної формації, що включає основні, кислі, лужні та гібридні різновиди. Граніти рапаківі та їх фаціальні різновиди займають 75 % його площі, габро-анортозити та гібридні породи монцонітового ряду — 25 % площі.

Граніти рапаківі в районі плутону утворюють два великі масиви, розділені широтною Смілянською зоною розломів, — Корсунь-Шевченківський у північній частині плутону і Шполянський у південній. Граніти обох масивів являють собою пластиноподібні тіла невеликої потужності, що збільшується поблизу контактів з габро-анортозитовими масивами [Кононов, 1966; Болюбах, 1972; Митрохин, 2011]. Породи основного складу утворюють чотири великі масиви: Новомиргородський, Смілянський, Городищенський і Межирічанський, представлені аноксидитами, габро-норитами, габро, норитами, олівіновими норитами, габро-монцонітами. Габро-анортозитові масиви порушені диференці-

йованими інтрузіями титаноносних норитів (Носачівське родовище). На контактах гранітів рапаківі з габроїдами розвинені гібридні породи, що є характерною особливістю Корсунь-Новомиргородського плутону. Це свідчить про ознаки магматичного змішування гранітоїдного та базитового розплавів і можливість їх синхронного занурення [Кривдик та ін., 2009; Митрохин, 2011].

Анортозити у складі плутону утворюють досить великі тіла, витримані за потужністю і простяганням, але різні за складом. Серед анортозитів плутону виділяють як світло-сірі андезити, так і темно-сірі анортозити, найчастіше представлені габро-норит-анортозитами, польовошпатовими піроксенітами і перидотитами, потужність шарів яких змінюється від перших метрів до десятків метрів [Кононов, 1966], серед масивів виділяються автономні тіла габро-норитів з січними контактами щодо анортозитів, що їх вмщують.

Породи основного складу залягають переважно в периферичних частинах плутону і контактують безпосередньо з породами інгуло-інгулецької серії та гранітоїдами новоукраїнського комплексу. Контакти основних порід і гранітів з вмсними породами мають інтрузивний характер без ознак асиміляції. Тектонічно Корсунь-Новомиргородський плутон є опущеною ділянкою земної кори Українського щита, обмеженою кільцевими розломами [Кононов, 1985; Митрохин, 2011].

**Гравітаційне поле.** Плутон розташований у межах регіонального Кіровоградського гравітаційного мінімуму, витягнутого у північно-західному напрямку, діапазон змін  $\Delta g$  дорівнює 60 мГал. За характером локального гравітаційного поля територію плутону можна поділити на три області: північну, центральну та південну. Інтенсивні аномалії північної області розташовані на його периферії і пов'язані з інтрузивами основного складу. Гравітаційне поле центральної області характеризується негативними значеннями сили тяжіння, у південній області спостерігається складнодиференційоване гравітаційне

поле, представлене групою позитивних і негативних аномалій у Новомиргородському районі. Позитивні аномалії пов'язані з інтрузивними тілами основного складу, негативні — областями розвитку гранітів рапаківі [Болюбах, 1972].

У центральній частині плутону в районі м. Городище позитивна аномалія сили тяжіння займає площу близько 660 км<sup>2</sup> і характеризується майже меридіональним простяганням, яке в північній частині переходить в північно-західне. Величина зміни градієнта сили тяжіння в районі західного схилу аномалії становить 2,8 мГал/км, східного — 1 мГал/км. Уздовж осі Городищенської аномалії спостерігається кілька окремих максимумів сили тяжіння, які в центральній і північно-західній частинах аномалії оконтурюються однією або двома ізолініями, а в південно-східній виділяються у вигляді різких вигинів ізоліній  $\Delta g$ .

Смілянська аномалія сили тяжіння займає площу 400 км<sup>2</sup> і має чітке простягання на північний захід. Величина зміни градієнтів сили тяжіння на окремих ділянках північно-східного і західного схилів становить 2,5—3,0 мГал/км, у районі північно-західного схилу не перевищує 1,5 мГал/км, південно-західного — 1 мГал/км. Уздовж осі Смілянської аномалії, як і на Городищенській площі, простежується ряд максимумів сили тяжіння. З характеристики гравітаційного поля Корсунь-Новомиргородського плутону видно, що у розподілі поля сили тяжіння є певна закономірність, яка виражається в зональному розподілі аномального поля. Виділяються ділянки, де позитивні аномалії розміщуються по периферії зональних масивів, а негативні в їх центрі. Подібний розподіл аномалій спостерігається на півночі, півдні і частково на заході центральної області плутону. У східній частині центральної області плутону по периферії масивів простежуються негативні аномалії, а в центрі — позитивні. Різко збурене поле сили тяжіння Корсунь-Новомиргородського плутону свідчить про складну геологічну будову цього регіону [Болюбах, 1972].

**Сейсмічні дослідження.** У різні роки

Корсунь-Новомиргородський плутон детально досліджувався сейсмічними методами (глибинним сейсмічним зондуванням (ГСЗ); методом обмінних хвиль землетрусів (МОХЗ), а на заході плутону в районі Городищенського габро-анортозитового масиву проводилися дослідження методом відбитих хвиль (МВХ) і спільної глибинної точки (СГТ) [Крюченко, Исанина, 1984; Дрогицкая, Шимків, 1986; Соллогуб 1986; Ильченко, 2003; Трипольский, Шаров, 2004].

Безпосередньо район досліджень перетнуто двома профілями ГСЗ у субмеридіо-

нальному напрямку (профіль XXIV) і субширотному (профіль XXX), що проходить на 20 км південніше (рис. 1) [Трипольский, Шаров, 2004]. З метою найповнішого вивчення будови земної кори у верхній частині розрізу і по глибинних горизонтах, включаючи перехідну зону кора—мантія, відпрацьовувалися дві системи зустрічних і нагоняючих годографів КМЗХ (кореляційний метод заломлених хвиль) і ГСЗ, що взаємно доповнювали одна одну. Відповідно до системи КМЗХ пункти вибуху розташовували на відстані 10—20 км один від одного, при ГСЗ — у середньому через

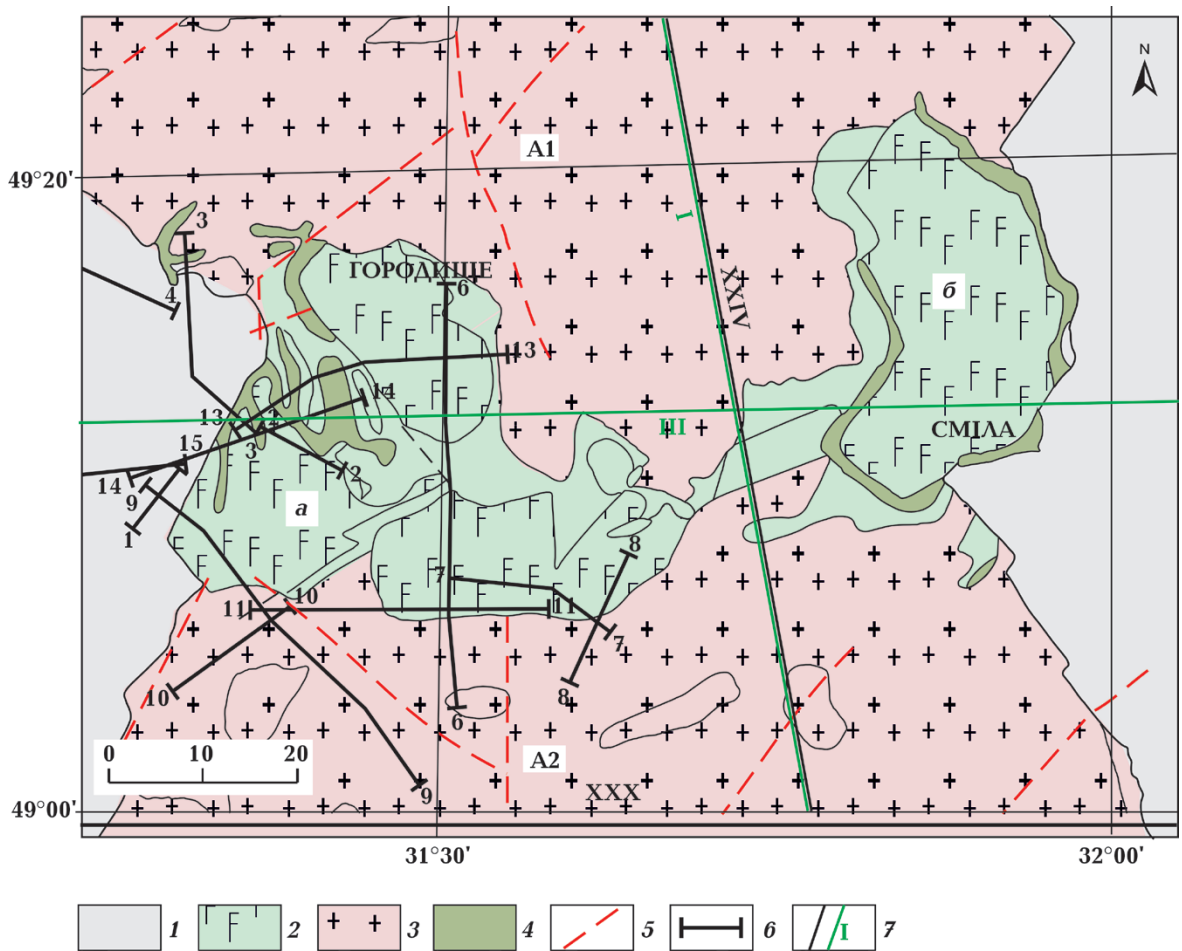


Рис. 1. Сейсмічна вивченість центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону: 1 — інгуло-інгулецька серія, 2 — габро-анортозити, 3 — граніти рапаківі, 4 — монзоніти, 5 — розломи, 6 — сейсмічні профілі СГТ, 7 — сейсмічні профілі ГСЗ і МОХЗ та їх номери. Масиви гранітів рапаківі: А1 — Корсунь-Шевченківський, А2 — Шполянський. Масиви габро-анортозитів: а — Городищенський, б — Смілянський.

Fig. 1. Seismic study of the central part of the Korsun-Novomirhorod pluton: 1 — Ingul-Ingulets series, 2 — gabbro-anorthosite, 3 — rapakivi granites, 4 — monzonite, 5 — faults, 6 — seismic profiles of CDP (common depth point), 7 — profiles of DSS and MCWE and their numbers; Massifs of rapakivi granites: A1 — Korsun-Shevchenkivsky, A2 — Shpoliansky. Massifs of gabbro-anorthosite: a — Gorodishchensky, b — Smilyansky.

40 км. Коливання реєстрували в інтервалі 100 м у частотному діапазоні 8—20 Гц переважно, починаючи від пунктів вибуху. При такій системі спостережень інтервал між сусідніми каналами становив менше половини довжини хвилі, що давало можливість впевнено здійснювати позиційну кореляцію і виділяти не лише витримані хвилі, а й короткі осі синфазності, які обумовлені штриховим характером хвильового поля. Довжина годографів досягала 220—280 км, для впевненості структурних побудов задавалися детальні системи зустрічних годографів. Висока ступінь детальності досліджень дала змогу отримати сейсмічні матеріали, що забезпечують фактично однозначні результати навіть при використанні різних прийомів і методів інтерпретації [Ильченко, 2003; Трипольський, Шаров, 2004].

На сейсмічних профілях ГСЗ у верхній літосфері Корсунь-Новомиргородського плутону зафіксовано дві основні протяжні сейсмічні поверхні:  $K_2$  і М, які характеризуються переважно субгоризонтальним заляганням в інтервалі глибин відповідно 10—12 і 40—46 км. У західній та східній частинах плутону, де проходять крайові розломні зони, границі  $K_2$  і М занурюються до глибин 15—16 і 44—46 км відповідно [Трипольський, Шаров, 2004]. У верхній частині земної кори плутону на глибині 4—10 км зареєстровано шар зі зниженою швидкістю, що відповідає зоні розповсюдження інтрузивного комплексу плутону.

Фіксація ступеню складності геологічних процесів, що призводять до формування нових блоків і структур, та розподіл точок обміну характеристик земної кори, що виражає ступінь її неоднорідності, є основним результатом застосування МОХЗ. За даними обмінних хвиль землетрусів у районі Корсунь-Новомиргородського плутону, в зоні розвитку анортозит-рапаківігранітної формації обміноздатність (що маркує ступінь гетерогенності кори) зростає і в центральній його частині на широті Городищенського та Смілянського габроанортозитових масивів (профіль III та центральна частина меридіонального профілю

I на рис. 1) досягає максимальних значень не тільки для цих профілів, а й для всього району досліджень. На південь від субширотного профілю III обміноздатність середовища поступово знижується до середнього рівня, а в зоні його з'єднання з Новоукраїнським масивом до фонових значень. Зміни рівня обміноздатності фіксуються не тільки вздовж профілів, а й по глибині. Виділяються дві аномальні області у верхній частині розрізу до глибини 10—12 км, що відповідає області розвитку гранітів рапаківі і шару знижених швидкостей на профілях ГСЗ та в зоні переходу кора—мантія на 40 км. Цю аномалію простежено і на широтному профілі III, що перетинає центральну частину масиву із заходу на схід. Вона простежується і західніше крайового розлому, що відокремлює плутон від порід рами. Можливо, рапаківі на глибині займають більший об'єм, ніж про це можна судити за даними геологічної зйомки. Раніше такий висновок було зроблено і за даними робіт методом СГТ [Дрогицкая, Шимків, 1986; Дрогицкая, 2012].

Для вивчення внутрішньої структури консолідованої кори широко застосовують сейсмічний метод відбитих хвиль, де використовуються вертикальні промені, зокрема у варіанті багаторазових перекриттів. Коло геолого-структурних завдань, що вирішуються за допомогою цих сейсмічних методів, охоплює діапазон від детального великомасштабного вивчення рудоносних об'єктів у верхній частині кори до дослідження тонкошарової структури всього розрізу верхньої літосфери, включаючи перехідну зону кора—мантія.

Детальні сейсмічні роботи методом СГТ та МВХ у районі Городищенського габроанортозитового масиву були проведені в 1977—1978 рр. В їх завдання входило вивчення розломної тектоніки району, встановлення меж поширення інтрузивного комплексу, дослідження його внутрішньої структури та характеру з'єднання з породами, що його вміщують. Роботи проводилися за системою коротких профілів, що перетинаються, пункти вибуху розташовувалися через 50 м, прийому — через 25 м

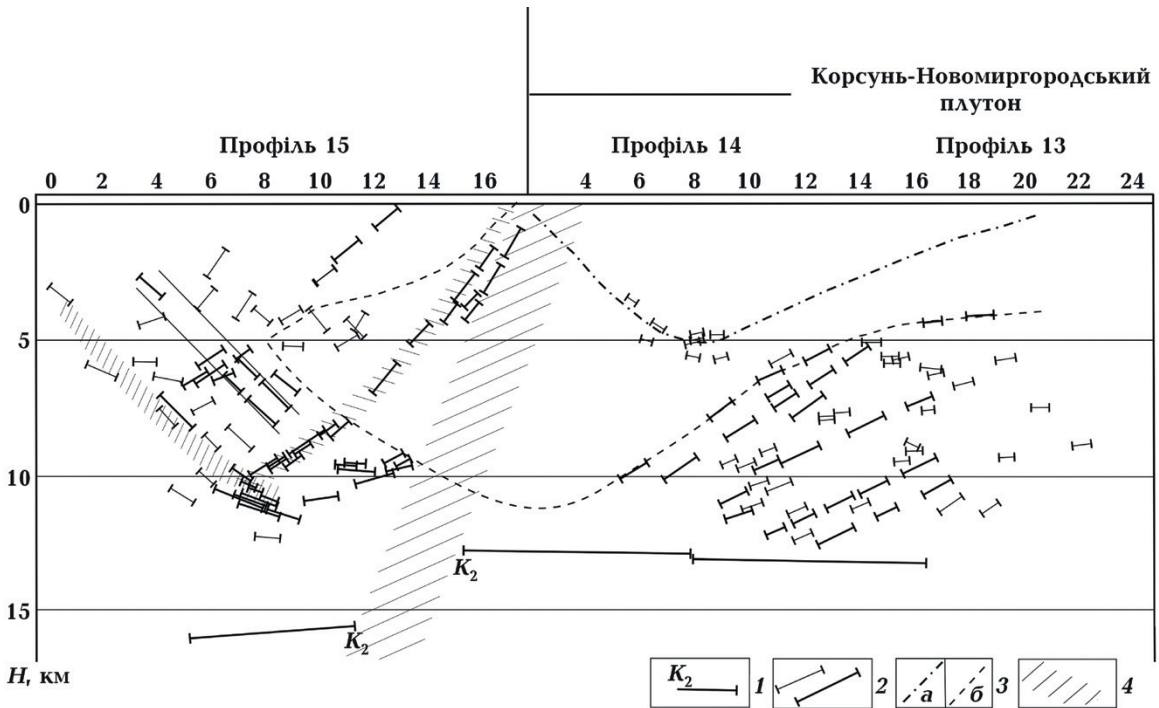


Рис. 2. Сейсмічний розріз через західний контакт Корсунь-Новомиргородського плутону за даними СГТ та гравітаційного моделювання [Дрогицька, Шимків, 1986]: 1 — поверхня  $K_2$  за даними ГСЗ ХХХ; 2 — відбиваючі площини за даними поздовжніх хвиль матеріалів СГТ; 3 — контури габро-анортозитів (а) та гранітів рапаківі за даними гравітаційного моделювання та максимального розповсюдження інтрузивного комплексу за даними СГТ (б); 4 — західний контакт Корсунь-Новомиргородського плутону.

Fig. 2. Seismic section through the western contact of the Korsun-Novomyrhorod pluton according to CDP data and gravity modeling [Drogytska, Shymkiv, 1986]: 1 — surface  $K_2$  according to DSS data; 2 — reflecting planes according to CDP data; 3 — contours of gabbro-anorthosite (a) and rapakivi granites (b) according to gravity modeling data; 4 — the western contact of the Korsun-Novomyrhorod pluton.

[Соллогуб и др., 1983; Дрогицкая, Шимків, 1986].

Характерною особливістю всіх хвильових полів, зареєстрованих уздовж профілів, що перетинають основні та кислі породи плутону, є наявність у верхній частині часового розрізу «прозорої» зони області хвильового поля, позбавленої відбиттів. Залежно від орієнтування профілю закономірно змінюється і конфігурація цієї зони, це є відображенням особливостей глибинної будови району і дає змогу виділити ту частину розрізу, де переважає розсіювання на дрібних неоднорідностях. Для зручності аналізу матеріалу та його подання непрямої близько розташовані профілі були об'єднані. Вийшло декілька віялоподібних перетинів Городищенського габро-анортозитового масиву. Так 13, 14 і 15 профілі (див. рис. 1), продовжуючи один

одного з деяким зломом, склали досить протяжний профіль завдовжки 40 км, що перетинає із заходу на схід гнейсо-мігматитову товщу інгуло-інгулецької серії, західний контакт плутону, масив габро-анортозитів і виходить в район розповсюдження гранітів рапаківі. Цей профіль найповніше висвітлює всі три комплекси, що беруть участь у будові досліджуваного району (рис. 2). Західна межа плутону являє собою тектонічне порушення, зафіксоване за наявності зон дроблення та мілонітизації. На глибинному сейсмічному розрізі воно простежується у вигляді серії майже паралельних непротяжних площин, що круто падають до 6—7 км, яким на часових розрізах відповідають домінуючі у хвильовому полі за інтенсивністю поздовжні та поперечні відбиті хвилі. Як можна судити по структурі відбиттів цієї групи порушен-

ня складається з низки дрібних розривів, які і є джерелом окремих непротяжних відбиттів. Це крайове порушення має глибинне закладання і виділено та простежено на розташованому дещо південніше профілі ГСЗ ХХХ. Воно встановлене по зміщенню як границі  $K_2$ , так і Мохо з амплітудою до 4—5 км у бік порід рами. Слід зазначити, що і за даними ГСЗ, і за даними детальних сейсмічних досліджень падіння розлому аналогічне.

Інтерес представляє характер контакту основних порід і гранітів рапаківі всередині інтрузиву. У районі Коростенського плутону такий контакт виявлено свердловиною Юрово-2 [Митрохин, 2011]. Контакт основних порід і гранітів рапаківі представляє перехідну зону, в якій вони зазнали поступових змін фізичних властивостей. Контакт не є різкою сейсмічною границею, що ускладнює їх поділ з використанням лише сейсмічних досліджень. Для вирішення цієї проблеми доцільно було б провести гравітаційне моделювання, оскільки породи основного складу та граніти контрастні за густиною. Такі моделі були побудовані [Дрогицкая, Шимкив, 1986] уздовж профілів СГТ в районі Городищенського габро-анортозитового масиву. Але для побудови об'ємної моделі глибинної будови всієї центральної частини плутону ці дані були інформативно обмеженими. У цій статті було розширено район досліджень і виконано тривимірне гравітаційне моделювання. Для параметризації геологічних джерел обрано апроксимаційну конструкцію, представлену набором тривимірних стрижневих тіл.

**Методика інтерпретації спостережених аномалій.** Використана методика поєднує різні методи та прийоми інтерпретації навколо головного цільового завдання — побудови моделі гравітаційних мас. Процес можна поділити на декілька етапів: вибір початкового наближення (початкова модель); оптимізація; аналіз моделей-рішень та їх геологічне тлумачення. На цьому прикладі обрано якісну структуру початкової моделі та визначено її кількісні характеристики. Оптимізація моделі вико-

нувалась у режимі автоматичного підбору. У зв'язку з багатоекстремальністю цільової функції процес мінімізації поділяють на глобальний пошук та локальний пошук у просторі. Оскільки глобальний пошук є складним завданням, то в цьому випадку вибір екстремуму для локального пошуку (початкової точки пошуку у просторі параметрів) здійснюється шляхом вибору початкової моделі та додаткових обмежень [Старостенко, 1978].

При дослідженні моделі-розв'язку виникли питання якості отриманих результатів. У цій ситуації обмежилися знаходженням допустимих меж значень параметрів з урахуванням апріорної інформації: на жаль, проблема оцінювання ефективності інтерпретації загалом потребує додаткових досліджень.

Теоретичні обґрунтування використаних алгоритмів інтерпретації та опис апроксимаційної моделі наведено в публікаціях [Булах, Шиншин, 2000; Булах, Лапина, 2002; Булах, 2010; Міхеєва та ін., 2023].

**Результати досліджень та їх аналіз.** Корсунь-Новомиргородський плутон в тектонічному відношенні належить до опущеної ділянки земної кори Українського щита і вкритий потужною (до 100—200 м) товщею відкладів. Тому відомості про фізичні властивості порід і характер їхнього контакту всередині інтрузиву з навколишніми породами були доповнені даними, отриманим за результатами буріння в районі Коростенського плутону, складеного породами подібного комплексу [Митрохин, 2011]. Корсунь-Новомиргородський плутон на поверхні представлений переважно гранітами рапаківі, для яких значення густини становлять  $2,59\text{—}2,6\text{ г/см}^3$ , а швидкість поширення пружних коливань може варіювати від 4,87 до 6,35 км/с за даними вимірювання на зразках. За матеріалами акустичного каротажу свердловин діапазон зміни швидкості поширення пружних хвиль для гранітів рапаківі знаходиться в межах 5,7—6,0 км/с. Особливістю цих утворень, як показали дослідження в свердловинах, є винятково низький рівень швидкісної диференціації, тобто кислі по-

роди досліджуваного району практично «прозорі» для пружних коливань. Надалі це стало основою для виділення в розрізі інтрузивного комплексу.

Основні породи, які входять до інтрузивного комплексу плутону, різноманітні за складом і відповідно характеризуються широким діапазоном зміни фізичних характеристик. Як показали дослідження на зразках, підвищення основності порід від кварцового нориту через габро-норит та габро чітко відбивається у значеннях густини. У західній частині плутону в області Городищенського габро-анортозитового масиву широко представлені анортозити ( $2,72 \text{ г/см}^3$ ), габро-анортозити ( $2,79 \text{ г/см}^3$ ) і габро-діабази ( $2,93 \text{ г/см}^3$ ). Ці породи по річці Вільшанка виходять на земну поверхню.

Анортозити та габро-норито-анортозити — переважаючі різновиди основних порід Корсунь-Новомиргородського плутону. Вони становлять 72—88 % площі окремих масивів [Макаренко та ін., 2021]. Характерна ознака основних порід коростенського комплексу — постійна присутність у них титану, кількість якого різко зростає у меланократових різновидах габро-норитів порівняно з Коростенським плутоном.

Швидкості поширення пружних коливань для основних порід району дослідження за даними акустичного каротажу становлять 6,2—6,6 км/с, співвідношення швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль —  $V_p/V_s=1,7\div 1,75$ .

Для Корсунь-Новомиргородського плутону породами, що містять інтрузивний комплекс, є гнейсо-мігматити інгуло-інгулецької серії. Переважно це біотитові гнейси з густиною  $2,65 \text{ г/см}^3$ , а також прошки мігматитів з густиною  $2,60 \text{ г/см}^3$ .

При побудові моделі першого наближення враховувалася геометрична конфігурація габро-анортозитових масивів за даними окремих сейсмічних профілів та інформація про густину комплексів, що їх складають.

Для вирішення поставленого завдання було застосовано комп'ютерну технологію автоматизованої системи інтерпретації гравітаційних полів. Використано ма-

теріали гравіметричної зйомки масштабу 1:200 000, середньоквадратична похибка визначення аномалій Буге цієї зйомки близько 0,8 мГал.

На рис. 3, а представлено карту аномалій сили тяжіння ділянки досліджень розміром  $25\times 38 \text{ км}$ . Для посилення аномалій від порід інтрузивного комплексу враховували вплив оточуючих порід, використовуючи поліном другого порядку. Фоновий вплив (рис. 3, б) обумовлений наявністю гнейсів інгуло-інгулецької серії, менш щільними порівняно з габро-анортозитами. У цьому випадку надлишкова густина менш щільних порід є від'ємною і відповідний їм гравітаційний ефект буде також від'ємним. Для виділення аномального поля цей від'ємний ефект вираховується із спостереженого поля, при цьому аномальний ефект поля збільшується, що цілком логічно у цій ситуації.

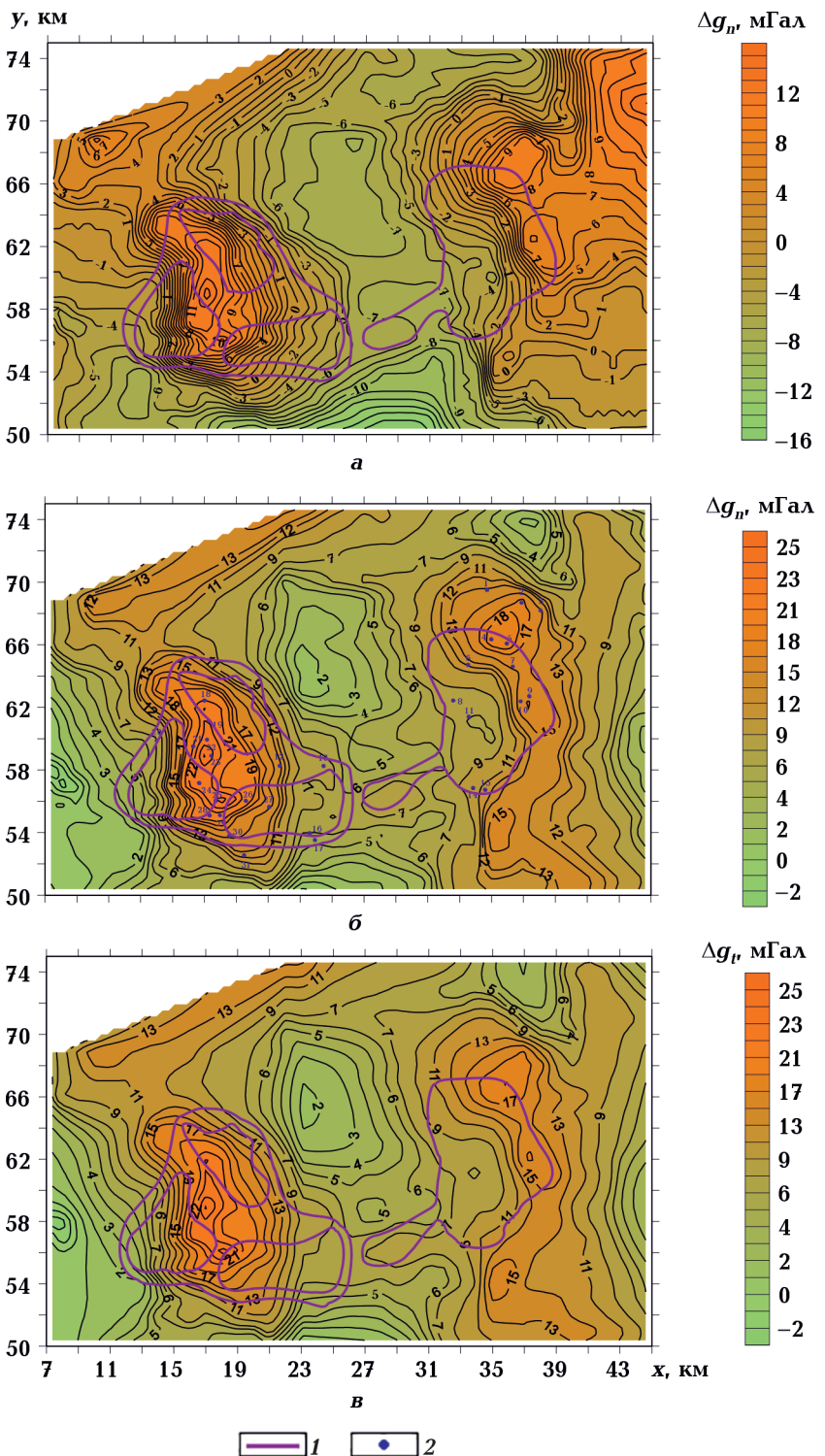
В аномальному полі зафіксовано 950 точок. Аналізуючи наявну апріорну інформацію, побудовано модель початкового наближення, що складається з 145 елементарних об'єктів. Як апроксимуючі осередки обрані тривимірні стрижневі тіла. На початку центри джерел розташовувалися на глибині  $h=2 \text{ км}$ , з надлишковою густиною  $-0,05 \text{ г/см}^3$  для гранітів рапаківі відносно гнейсів, що їх містять, і  $+0,2 \text{ г/см}^3$  для анортозитів. На початку ітераційного циклу значення функціоналу становило  $F_0=45166 \text{ мГал}^2$ . Для вирішення завдання використовували різні методичні прийоми, включно з моделюванням при різних вихідних наближеннях. Оптимальний варіант визначено за середнім відхиленням ( $\Delta_{\text{ср}}$ ) між спостереженим і теоретичним полями. Після проведення 190 ітерацій було досягнуто значення функціоналу  $F=153,27895 \text{ мГал}^2$ , що дало змогу описати аномальне гравітаційне поле з високою точністю.

В таблиці наведено параметри геологічної моделі, представленої найбільш інформативними тілами (31 тіло). Глибина розташування збурювальних об'єктів досягає 5,07 км, при цьому верхня кромка варіює від 0,01 до 1,0 км, нижня — від 1,4



Рис. 3. Ділянка району досліджень. Центральна частина Корсунь-Новомиргородського плутону (Городищенський та Смілянський габро-анортозитові масиви): *а* — карта ізодинам спостереженого гравітаційного поля  $\Delta g_n$ , мГал; *б* — карта ізодинам спостереженого гравітаційного поля  $\Delta g_n$  з виключеним фоновим впливом, мГал; *в* — результати розв'язання тривимірної оберненої задачі гравіметрії: карта ізодинам гравітаційного поля  $\Delta g_n$ , обумовленого апроксимаційною моделлю, мГал; 1 — контур масиву габро-анортозитів, 2 — розташування центрів тяжіння елементів апроксимаційної конструкції.

Fig. 3. The site of the research area. The central part of the Korsun-Novomirgorod pluton (Gorodishchensky and Smilyansky gabbro-anorthosite massifs): *a* — isodyne map of the observed gravity field,  $\Delta g_n$  mGal; *б* — isodyne map of the observed gravitational field with excluded background influence  $\Delta g_n$ , mGal; *в* — the results of solving the three-dimensional inverse problem of gravimetry: the isodyne map of the gravitational field determined by the approximation model  $\Delta g_n$ , mGal; 1 — outline of the gabbro-anorthosite massif, 2 — location of the centers of gravity of the elements of the approximation structure.



до 5,07 км, глибини центрів тяжіння збудувальних джерел — від 0,9 до 2,6 км, значення надлишкової густини розподіляються в інтервалі від  $-0,1$  до  $0,3$  г/см<sup>3</sup>. Результати використано для побудови карти ізодинам теоретичного поля (рис. 3, в) у площині  $xOy$ . На рис. 4 зображені схеми ізогіпс глибин

залягання центрів тяжіння тіл, верхньої та нижньої меж підібраних джерел відповідно. На рис. 5 наведено карту-схему геологічної будови центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону (Городищенський та Смілянський габро-анортозитові масиви) і карту-схему ізогіпс

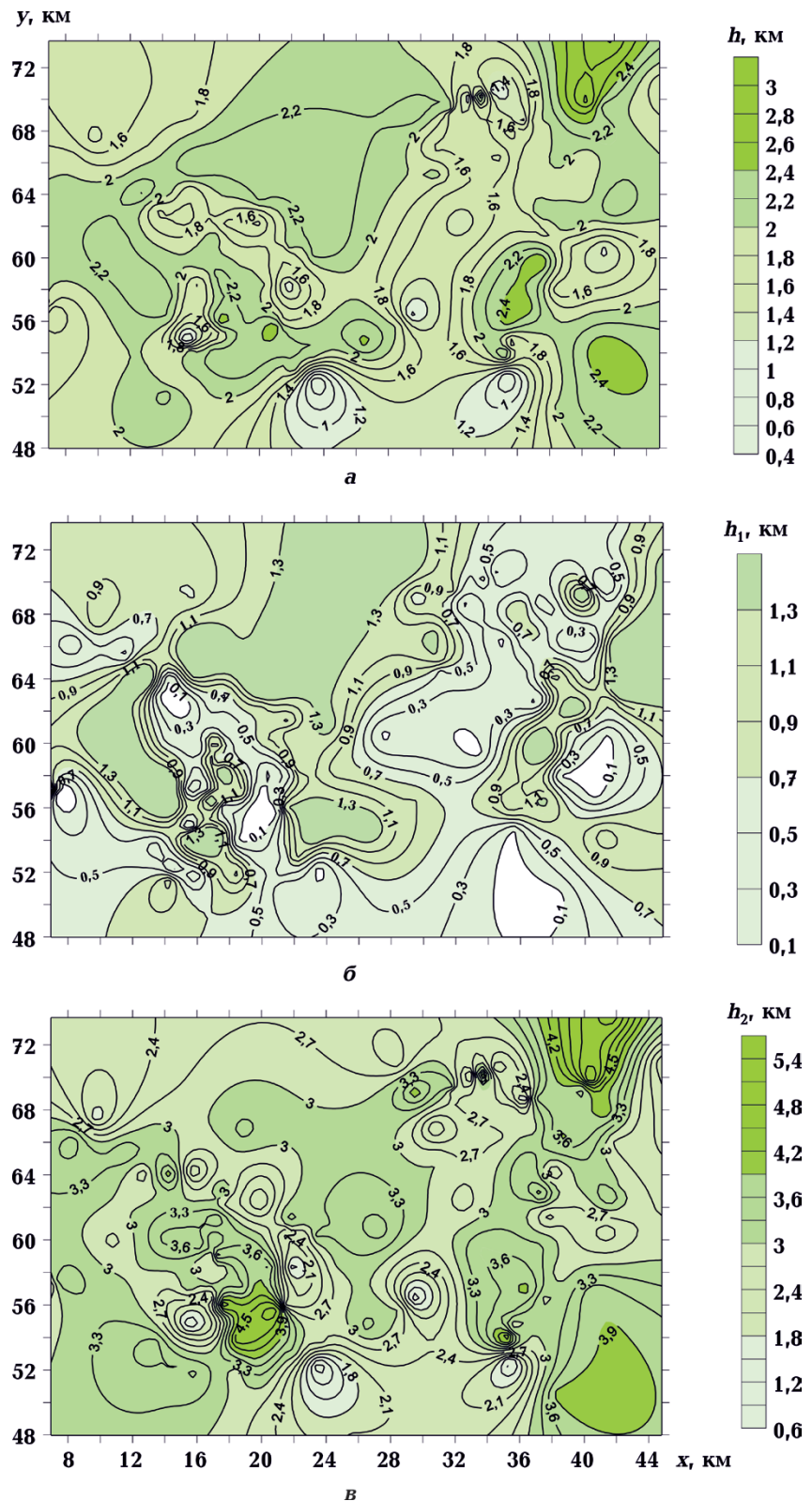


Рис. 4. Карти-схеми ізогіпс глибин залягання: *a* — центрів тяжіння елементів апроксимаційної моделі, км; *b* — верхньої кромки елементів апроксимаційної моделі, км; *v* — нижньої кромки елементів апроксимаційної моделі, км.

Fig. 4. Maps-schemes of isoglyphs of the depths of occurrence: *a* — centers of gravity of the elements of the approximation model, km; *b* — the upper edge of the elements of the approximation model, km; *v* — the lower edge of the elements of the approximation model, km.

глибин нижньої кромки та розташування тіл геологічної моделі.

Розбіжність значень спостереженого та модельного полів в евклідовій метриці ( $L_2$ )

становить  $\sim 0,35$  мГал, що свідчить про те, що необхідні умови для точності кількісної інтерпретації виконано. У результаті отримано апостеріорну інтерпретаційну модель

## Параметри геологічної моделі, одержані за результатами розв'язку оберненої задачі

Номер	Густина, г/см <sup>3</sup>			Довжини стрижнів, км			Координати центру тяжіння, км			Глибина верхньої кромки, км	Глибина нижньої кромки, км
	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$t_x$	$t_y$	$t_z$	$c_x$	$c_y$	$h$	$h_1$	$h_2$
1	2,76	2,77	2,79	0,1	2,7	1,1	34,7	69,7	1,4	0,27	2,44
2	2,85	2,79	2,86	1,0	0,04	1,74	36,9	68,7	1,9	0,19	3,67
3	2,85	2,84	2,86	0,4	0,2	1,8	38,0	68,3	2,0	0,22	3,73
4	2,86	2,87	2,84	1,3	1,0	1,3	34,9	66,3	1,3	0,02	2,65
5	2,89	2,84	2,79	2,5	1,6	1,3	36,2	66,1	1,8	0,58	3,09
6	2,71	2,69	2,68	1,3	1,7	1,1	33,4	64,7	1,6	0,5	2,7
7	2,71	2,76	2,70	0,8	1,2	1,6	36,5	64,6	2,0	0,32	3,61
8	2,76	2,87	2,79	1,3	2,2	1,2	32,5	62,3	1,3	0,2	2,53
9	2,69	2,70	2,68	0,4	0,9	2,1	37,3	62,8	2,2	0,11	4,21
10	2,81	2,84	2,89	0,1	1,8	1,5	36,9	62,4	1,7	0,11	3,2
11	2,72	2,76	2,71	0,9	1,0	1,8	33,5	59,4	1,8	0,02	3,64
12	2,80	2,72	2,76	1,4	4,0	0,5	21,8	58,3	0,9	0,46	1,4
13	2,82	2,83	2,84	0,2	2,3	1,1	24,5	58,4	1,9	0,77	2,98
14	2,85	2,84	2,86	2,1	1,7	1,4	33,7	57,0	2,2	0,8	3,51
15	2,74	2,72	2,74	1,2	1,0	1,2	34,6	56,8	2,3	1,08	3,48
16	2,84	2,83	2,85	3,7	1,3	0,7	23,4	54,0	1,5	0,80	2,73
17	2,61	2,61	2,60	1,1	1,1	0,9	23,6	53,7	1,9	0,97	2,85
18	2,89	2,89	2,79	1,1	0,9	1,2	17,0	62,3	1,8	0,6	3,0
19	2,79	2,89	2,79	0,7	1,2	1,8	17,2	61,3	2,2	0,4	3,0
20	2,77	2,79	2,80	0,27	0,12	1,62	14,0	60,0	2,10	0,48	3,72
21	2,79	2,80	2,83	0,48	0,83	1,77	16,3	59,7	2,10	0,3	3,88
22	2,79	2,89	2,69	0,5	0,9	0,6	17,1	60,0	2,1	1,5	2,7
23	2,79	2,79	2,89	1,1	1,0	1,8	17,3	59,0	2,3	0,5	4,1
24	2,89	2,89	2,89	1,0	0,9	1,4	16,7	57,2	1,7	0,3	3,1
25	2,79	2,79	2,89	1,1	0,9	2,3	17,6	56,0	2,6	0,3	4,9
26	2,79	2,82	2,89	1,17	1,25	2,14	19,4	56,0	2,15	0,01	4,29
27	2,78	2,79	2,78	1,38	1,46	2,52	21,0	55,77	2,54	0,02	5,07
28	2,79	2,78	2,79	0,86	0,63	0,77	17,1	55,18	1,51	0,75	2,28
29	2,79	2,80	2,81	0,81	0,86	1,27	17,8	55,10	1,85	0,59	3,12
30	2,79	2,79	2,79	1,0	1,2	2,35	18,4	53,9	2,4	0,05	4,75
31	2,89	2,89	2,89	1,8	1,7	1,6	19,6	52,5	2,1	0,5	3,7

розподілу густинних неоднорідностей, що задовольняє як спостережене поле, так і апріорну геологічну інформацію.

При вирішенні поставленого завдання підбрано різні критерії локальної оптимізації в процесі моделювання джерел гравітаційного поля. В ітераційному процесі обчислювалися три різні функціонали. Для зменшення мультиплікативної завади мінімізувалося максимальне співвідношення амплітуд полів у всіх точках вимірів.

У процесі досліджень встановлено, що

застосування різних типів функціоналів локальної оптимізації в алгоритмах методів підбору є доцільним. Надалі це допоможе створювати нові алгоритми, які розширюють множину допустимих розв'язків оберненої задачі при тому самому початковому наближенні, що необхідно для створення та реалізації адитивних технологій кількісної інтерпретації даних гравірозвідки та магніторозвідки.

Доведено, що спільне використання функціоналів якості дасть змогу зменшити

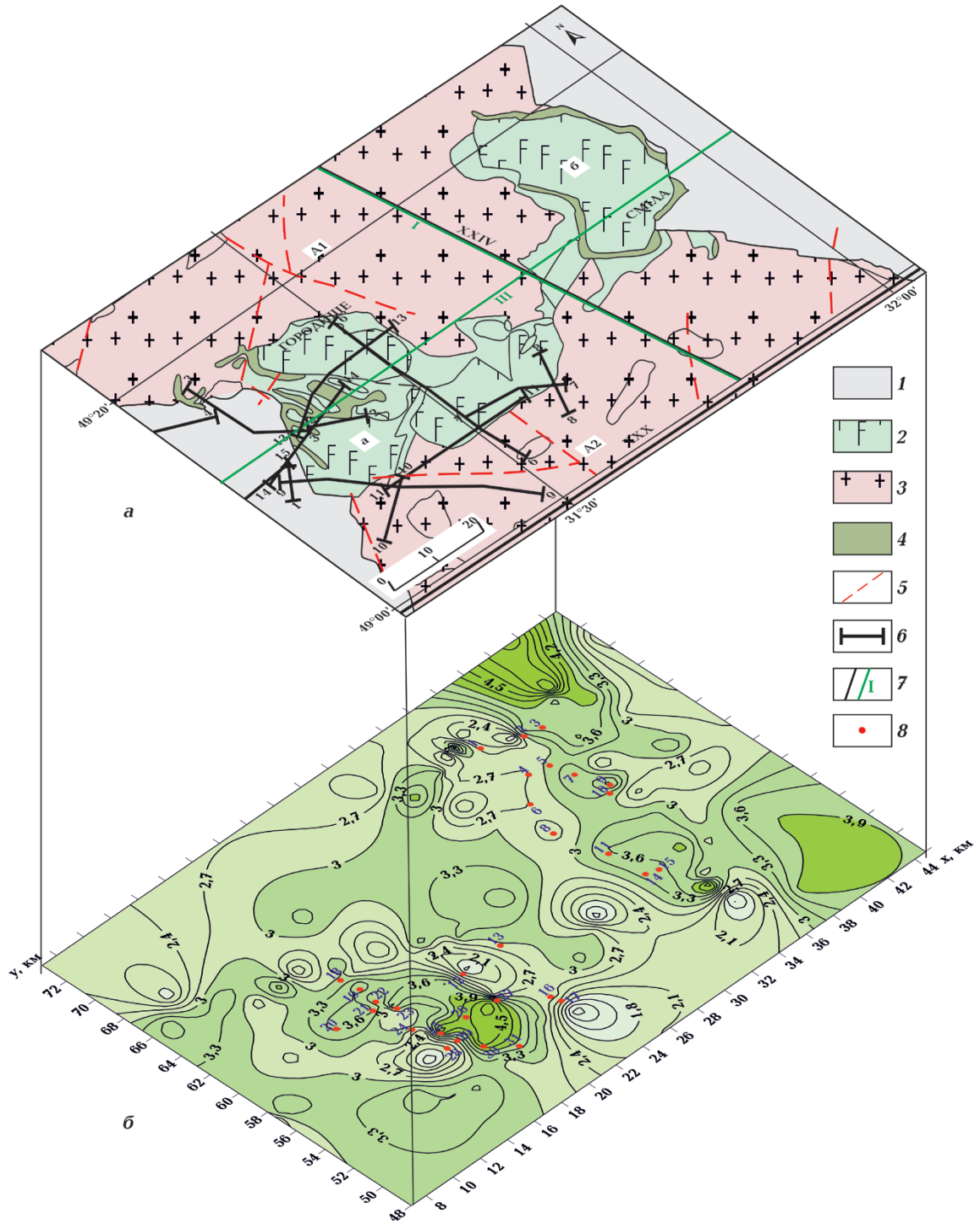


Рис. 5. Карта-схема: *a* — геологічної будови центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону; *б* — карта-схема ізогіпс глибин залягання нижньої кромки апроксимаційної моделі, одержаної в результаті розв'язання оберненої задачі; 1 — гнейси, 2 — граніти рапаківі, 3 — габро-анортозити, 4 — монзоніти, 5 — розломи, 6 — сейсмічні профілі СГТ, 7 — сейсмічні профілі ГСЗ і МОХЗ та їх номери, 8 — розташування об'єктів підбраної моделі.

Fig. 5. Schematic map: *a* — geological structure of the central part of the Korsun-Novomirgorod pluton; *б* — a map-diagram of isogypses of the depths of the lower edge of the approximation model, obtained as a result of solving the inverse problem: 1 — gneisses, 2 — rapakivi granites, 3 — gabbro-anorthosite, 4 — monzonites, 5 — faults, 6 — seismic profiles of CDP, 7 — seismic profiles of DSS and MCWE and their numbers, 8 — location of objects of the selected model.

кількість різних видів завад у спостережених даних геопотенціальних полів.

Таким чином, у районі Городищенсько-го та Смілянського габро-анортозитових масивів за сейсмічними даними визначено межі поширення інтрузивного комплексу, а гравітаційне моделювання дозволило оконтурити в розрізі масиви порід основного складу.

**Висновки.** Корсунь-Новомиргородський плутон детально вивчено як геологічними, так і геофізичними методами. У районі його західного контакту в Городищенському габро-анортозитовому масиві проведено детальні сейсмічні спостереження за методикою СГТ. Структурні особливості інтрузивного комплексу і оточуючих гнейсів інгуло-інгулецької серії відбилися в характері хвильових полів, що дало можливість визначити границі всього інтрузиву, включаючи граніти рапаківі та породи основного складу.

Для поділу відмінних за густиною комплексів було виконано тривимірне гравітаційне моделювання з використанням комп'ютерної технології автоматизованої інтерпретації геофізичних даних на основі методу підбору. Для параметризації геологічних джерел запропоновано апроксимаційну конструкцію, представлену набором тривимірних стрижневих тіл.

Підібрана модель в результаті розв'язання оберненої гравітаційної задачі з використанням стрижневої апроксимаційної конструкції являє собою два аномальних тіла в районі Городищенського габро-анортозитового масиву на заході та Смілянського на сході з максимальною потужністю 4—5 км. До центру плутону потужність

основних порід зменшується, на поверхні зафіксовані лише граніти рапаківі потужністю до 2 км. Максимальну потужність як гранітів рапаківі, так і габро-анортозитів встановлено в районі західного та східного контактів плутону. Це великі глибинні порушення, закартовані на поверхні та зафіксовані на глибині за сейсмічними даними. Падіння обох контактів від плутону до порід, що його оточують.

У процесі розв'язання задачі застосовувалися різні критерії оптимізації для моделювання джерел гравітаційного поля, що дало змогу мінімізувати завади в спостережуваних даних. Поєднання кількох функціоналів якості допомогло зменшити вплив завад на результати спостережень.

Результати тривимірного моделювання з використанням тристрижневої моделі на великій кількості вхідних даних при дослідженні габро-анортозитових об'єктів продемонстрували стійкість і надійність комп'ютерного забезпечення, що дозволяє його використовувати для вивчення глибинної структури аналогічних габро-анортозитових масивів як Корсунь-Новомиргородського, так і Коростенського плутонів.

За допомогою комп'ютерної технології, що використовувалась при підборі розподілу густини, досліджено розподіл цих параметрів не тільки за площею, а й за глибиною, що значно розширює можливості геологічної інтерпретації.

Моделі, отримані за геофізичними даними, важливі для вивчення внутрішньої структури габро-анортозитових масивів, розуміння їх генезису та перспектив пошуку титанового зруденіння.

### Список літератури

Болюбах К.А. *Глибинна будова центральних районів Українського щита*. Київ: Наук. думка, 1972, 96 с.

Булах Е.Г. *Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии*. Киев: Наук. думка, 2010, 463 с.

Булах Е.Г., Лапина Е.П. Обратные задачи магнитометрии в классе стержневых тел в свя-

зи с построением аналитической модели исходного поля. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 4. С. 67—74.

Булах Е.Г., Шиншин И.В. Алгоритмическое и программное решение задачи построения аналитической модели гравитационного поля. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 2. С. 107—114.

Дрогицкая Г.М. Построение 3D сейсмогеоло-

- гической модели Кировоградского рудного района по данным обменных волн землетрясений. В зб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Київ: 2012, С. 39—50.
- Дрогицкая Г.М., Шимкив Л.М. Глубинное строение западной части Корсунь-Новомиргородского плутона по данным сейсмических отраженных волн и гравитационного моделирования. *Геофиз. журн.* 1986. Т. 8. № 2. С. 76—82.
- Ильченко Т.В. Строение земной коры и верхов мантии Кировоградского блока Украинского щита по данным ГСЗ (профили Бабанка—Пятихатки и Черкассы—Новый Буг). *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 6. С. 30—42.
- Кононов Ю.В. *Габрові масиви Українського щита*. Київ: Наук. думка, 1966, 98 с.
- Кононов Ю.В. *Металлоносність габброидних пород Українського щита*. Киев: Наук. думка, 1985, 100 с.
- Кривдик С.Г., Гуравський Т.В., Дубина О.В., Братчук О.М., Мархай О.І., Нечаєнко О.М., Якубенко П.Ф. Особливості речовинного складу Носачівського апатит-ільменітового родовища (Корсунь-Новомиргородський плутон, Український щит). *Мінерал. журн.* 2009. № 3. С. 55—78.
- Крюченко В.А., Исанина Э.В. Опыт комплексной интерпретации материалов МОВЗ и гравиметрии в центральной части Украинского щита. В кн.: *Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины*. Киев: Наук. думка, 1984, С. 16—26.
- Макаренко І.В., Старостенко В.І., Купрієнко П.Я., Савченко О.С., Легостаєва О.В. *Неоднорідність земної кори України і суміжних регіонів за 3D гравітаційним моделюванням*. Київ: Наук. думка, 2021, 204 с.
- Митрохин О.В. Анортозит-рапаківігранітна формація Українського щита (геологія, речовий склад та умови формування): *автореф. гис. ... г-ра геол. наук*. Київ, 2011, 39 с.
- Міхеєва Т.Л., Дрогицька Г.М., Лапіна О.П. Гравітаційне моделювання рудних габроїдів Корсунь-Новомиргородського плутону. *Геофиз. журн.* 2023. Т. 45. № 6. С. 127—140. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293311>.
- Соллогуб В.Б. *Литосфера Украины*. Киев: Наук. думка, 1986, 184 с.
- Соллогуб В.Б., Гринь Н.Е., Гонтовая Л.И., Дрогицкая Г.М. Глубинные сейсмические исследование консолидированной коры методом отраженных волн. *Геофиз. журн.* 1983. Т. 5. № 2. С. 3—12.
- Старостенко В.И. *Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии*. Киев: Наук. думка, 1978, 228 с.
- Трипольский А.А., Шаров Н.В. *Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004, 159 с.

## Results of gravity modeling of the central part of the Korsun-Novomyrhorod pluton (Ukrainian Shield)

*T.L. Mikheeva, G.M. Drogytska, O.P. Lapina, 2024*

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

Three-dimensional gravity modeling of the Gorodishchen and Smilyan gabbro-anorthosite massifs, located in the central part of the Korsun'-Novomyrhorod pluton (Ukrainian shield), was performed. A three-dimensional model of the upper crust of the research area was developed using maps of the anomalous gravity field of 1:200 000 scale, taking into account the results of detailed seismic studies by the methods of the RWM (reflected wave method) and CDP (common depth point). Differences in the structure of

the intrusive complex of the anorthosite-rapakivi granite formation and the gneisses of the Ingulo-Ingulets series surrounding it were reflected in the seismic wave fields, which made it possible to determine the boundaries of the entire intrusive. For separating the basic rocks and rapakivi granites that differ in their density, three-dimensional gravity modeling was performed using computer technology of automated interpretation of geophysical data based on the trial and error method. For the geological objects parameterization, an approximation model is proposed, which is represented by a set of three-dimensional rod bodies.

In the process of solving the inverse problem, various criteria for local optimization of gravity field sources were implemented. Three different functionals were calculated during the iterative process. It is proved that the joint use of the functionals allows to reduce various types of noise in the observed gravity data. During the solving the inverse problem we found out that using of various types of functionals in the algorithms of trial and error methods is quite appropriate.

Three-dimensional gravity modeling made it possible to identify and outline gabbro-anorthosite bodies in the upper part of the section with maximum thickness of up to 4–5 km, to clarify the shape and dimensions of the rapakivi granites, and to study the contacts of the intrusive complex with the gneisses surrounding it. The obtained model, which takes into account all the available information on density and geometric parameters of the anomaly forming objects, could be used to obtain additional reliable geological information about the structure of the Gorodishchensk and Smilyan gabbro-anorthosite massifs.

The reliability of this algorithm for three-dimensional trial and error gravity method, using an approximation model in the form of a three-dimensional rods construction, allows us to recommend it for the study of similar gabbro-anorthosite massifs of the Ukrainian Shield, primarily the Korosten pluton.

**Key words:** Ukrainian Shield, Korsun'-Novomirgorod pluton, gabbro-anorthosite massif, upper crust, three-dimensional gravity modeling, inverse problem, trial and error method.

## References

- Bolyubakh, K.A. (1972). *Deep structure of the central regions of the Ukrainian Shield*. Kiev: Naukova Dumka, 96 p. (in Russian).
- Bulakh, E.G. (2010). *Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry*. Kiev: Naukova Dumka, 463 p. (in Russian).
- Bulakh, E.G., & Lapina, E.P. (2002). Inverse problems of magnetometry in the class of rod bodies in connection with the construction of an analytical model of the original field. *Geofizicheskij Zhurnal*, 24(4), 67–74 (in Russian).
- Bulakh, E.G., & Shinshin, I.V. (2000). Algorithmic and software solution to the problem of constructing an analytical model of the gravitational field. *Geofizicheskij Zhurnal*, 22(2), 107–114 (in Russian).
- Drogitskaya, G.M. (2012). Construction of a 3D seismic-geological model of the Kirovograd ore region based on the data of converted waves of earthquakes. In *Theoretical and applied aspects of geoinformatics* (pp. 39–50). Kyiv (in Russian).
- Drogitskaya, G.M., & Shimkiv, L.M. (1986). Deep structure of the western part of the Korsun-Novomirgorod pluton according to seismic reflected waves and gravity modeling. *Geofizicheskij Zhurnal*, 8(2), 76–82 (in Russian).
- Ilichenko, T.V. (2003). The structure of the earth's crust and upper mantle of the Kirovograd block of the Ukrainian shield according to the DSS data (Babanka—Pyatikhatka and Cherkassy—Novyi Bug profiles). *Geofizicheskij Zhurnal*, 25(6), 30–42 (in Russian).
- Kononov, Yu.V. (1966). *Gabrovo massif of the Ukrainian Shield*. Kyiv: Naukova Dumka, 98 p. (in Ukrainian).
- Kononov, Yu.V. (1985). *Metal content of gabbroic rocks of the Ukrainian Shield*. Kiev: Naukova Dumka, 100 p. (in Russian).
- Kryvdyk, S.G., Guravskiy, T.V., Dubyna, O.V.,

- Bratchuk, O.M., Markhai, O.I., Nechayenko, O.M., & Yakubenko, P.F. (2009). Features of composition of apatite-ilmenite from Nosachiv deposit (Korsun-Novomyrhorod pluton, Ukrainian Shield). *Mineralogical Journal*, (3), 55—78 (in Ukraine).
- Kryuchenko, V.A., & Isanina, E.V. (1984). Experience of integrated interpretation of MOVZ materials and gravimetry in the central part of the Ukrainian shield. In *Deep structure of the earth's crust and upper mantle of Ukraine* (pp. 16—26). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Makarenko, I.V., Starostenko, V.I., Kuprienko, P. Ya., Savchenko, O.S., & Legostaeva, O.V. (2021). *Heterogeneity of the earth's crust of Ukraine and adjacent regions according to 3D gravity modeling*. Kyiv: Naukova Dumka, 204 p. (in Ukrainian).
- Mytrokhyn, O.V. (2011). Anothosite-rapakivi-granite association of Ukrainian Shield (geology, composition and origin). *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv, 39 p. (in Ukrainian).
- Mikheeva, T.L., Drogitska, G.M., & Lapina, O.P. (2023). Gravity modeling of ore gabbroids Korsun-Novomirhorod pluton. *Geofizychnyi Zhurnal*, 45(6), 127—140. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293311> (in Ukrainian).
- Sollogub, V.B. (1986). *The lithosphere of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. (in Russian).
- Sollogub, V.B., Grin, N.E., Gontovaya, L.I., & Drogitskaya, G.M. (1983). Deep seismic study of the consolidated crust using the reflected wave method. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 5(2), 3—12 (in Russian).
- Starostenko, V.I. (1978). *Robust numerical methods in gravimetry problems*. Kiev: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Tripolskiy, A.A., & Sharov, N.V. (2004). *Lithosphere of the Precambrian shields of the northern hemisphere of the Earth according to seismic data*. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, 159 p. (in Russian).