

Гравітаційне моделювання рудних габроїдів Корсунь-Новомиргородського плутону

Т.Л. Міхеєва, Г.М. Дрогицька, О.П. Лапіна, 2023

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 2 серпня 2023 р.

Виконано тривимірне гравітаційне моделювання Городищенського габро-анортозитового масиву, розташованого в межах Корсунь-Новомиргородського плутону Українського щита. Створено тривимірну модель верхньої кори з використанням карт аномального гравітаційного поля масштабу 1:200000 з урахуванням даних сейсмічних методів різних модифікацій. Відмінності в структурі інтрузивного комплексу та гнейсів, що його вміщують, відбилися в сейсмічних хвильових полях, це дало можливість визначити границі всього інтрузиву: гранітів рапаківі та порід основного складу. Для поділу цих комплексів, відмінних за густиною, було виконано тривимірне гравітаційне моделювання. Це дало змогу виділити у верхній частині розрізу тіла габро-анортозитів з максимальною товщиною 5 км і вивчити контакти інтрузивного комплексу з гнейсами, що його вміщують.

У процесі розв'язання обернених задач здійснено різні критерії локальної оптимізації джерел гравітаційного поля. В ітераційному процесі обчислювались три різних функціонали. Як нев'язку вибрано середній квадрат різниці спостереженого та теоретичного поля — F_1 , середню суму модулів різниці полів — функціонал F_2 , попереднє логарифмування параметрів — функціонал F_3 . Доведено, що спільне використання функціоналів дозволяє здійснити зменшення різних видів завад у спостережених даних геопотенціальних полів. У процесі досліджень встановлено, що застосування різних типів функціоналів в алгоритмах методів підбору є цілком доцільним. У подальшому це дасть можливість створювати нові алгоритми, які покращують допустимі розв'язки оберненої задачі, що необхідно для реалізації адитивних технологій кількісної інтерпретації даних гравірозвідки.

Побудовану модель, що враховує всю наявну апріорну інформацію про густину та геометричні параметри аномалієзбурюючих об'єктів, можна буде використовувати для отримання додаткової достовірної геологічної інформації про габро-анортозитові масиви Українського щита.

Ключові слова: плутон, габро-анортозитовий масив, верхня кора, тривимірне гравітаційне моделювання, обернена задача, метод підбору.

Вступ. У межах Корсунь-Новомиргородського та Коростенського плутонів Українського щита та їх обрамлення досліджено цілу низку корінних родовищ і проявів апатит-ільменітових та ільменіт-титаномagnetитових руд, які просторово та генетично пов'язані з тілами габроїдів

[Проскурин, 1984; Тарасенко, 1988; Егоров и др., 1989; Кривдик та ін., 2008]. Через виснаження запасів розсипних і залишкових родовищ ільменіту в корі вивітрювання стає актуальною промислова розробка корінних титаноносних покладів, яка може бути рентабельною при вилученні разом

Citation: Mikheeva, T.L., Drogitskay, G.M., & Lapina, O.P. (2023). Gravity modeling of ore gabbroids Korsun-Novomirhorod pluton. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(6), 127—143. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293311>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

із титаном супутніх йому елементів [Галецький, Ремезова, 2007]. Для уточнення характеру розподілу рудної мінералізації у вже виявлених і у зв'язку з пошуками нових корінних покладів увагу заслуговують питання інтерпретації та тлумачення гравітаційних аномалій над габро-анортозитовими масивами і безпосередньо над тілами рудних габроїдів.

Носачівське апатит-ільменітове родовище поки що єдине такого типу в Корсунь-Новомиргородському плутоні, воно розташоване в центральній його частині в межах західного відгалуження від Смілянського анортозитового масиву. Вмісними породами для рудних тіл є анортозити і габро-анортозити.

Корсунь-Новомиргородський плутон досить детально досліджено сейсмічними методами. У різні роки тут було виконано глибинне сейсмічне зондування (ГСЗ), проведено дослідження метод обмінних хвиль землетрусів (МОХЗ), а на заході плутону — методом відбитих хвиль (МВХ) і спільної глибинної точки (СГТ) [Крюченко, Исанина, 1984; Соллогуб, 1986; Дрогицька, Шимків, 1986]. Детальні дослідження консолідованої кори шляхом накопичення відбитих хвиль у докритичній області за системою багаторазових перекриттів, відпрацьовані в районі Городищенського анортозитового масиву, мають досить високу роздільну здатність, що дало змогу вивчити гетерогенну структуру верхньої кори.

Відмінності в структурі інтрузивного комплексу та гнейсів, що його вміщують, відбилися в сейсмічних хвильових полях. Це дало можливість визначити границі всього інтрузиву, гранітів рапаківі та порід основного складу. Для поділу цих відмінних за густиною комплексів було виконано тривимірне гравітаційне моделювання Городищенського габро-анортозитового масиву за допомогою комп'ютерної технології автоматизованої системи інтерпретації геофізичних даних на основі методу підбору [Булах, Шиншин, 2000]. Для параметризації геологічних джерел запропоновано апроксимаційну конструкцію, яка представлена набором тривимірних стрижневих тіл.

Геологічна характеристика району дослідження. Анортозит-рапаківігранітна формація, якою складений Корсунь-Новомиргородський плутон, є одним з найцікавіших проявів докембрійського магматизму. Складні багатофазні анортозит-рапаківігранітні комплекси, які можуть містити величезні плутони, малі інтрузії та вулканічні товщі, поширені в докембрії всіх континентів і є індикаторами їхньої тектонічної еволюції. З ними просторово та генетично пов'язані промислові родовища та рудопрояви олова, берилію, літію, вольфраму, титану, ванадію, скандію, фосфору,

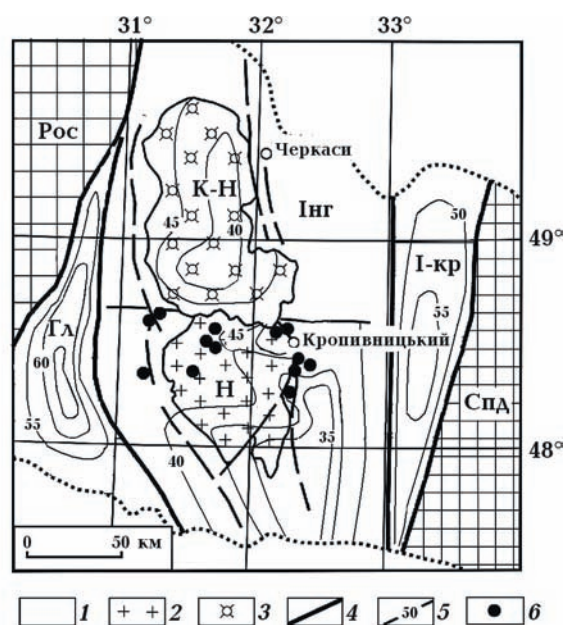


Рис. 1. Положення Корсунь-Новомиргородського плутону в тектонічних структурах центральної частини Українського щита: 1 — інгуло-інгулецька серія, 2 — гранітоїди, 3 — граніти рапаківі та анортозити Корсунь-Новомиргородського плутону, 4 — зони розломів, 5 — ізогіпси поділу Мохо [Соллогуб, 1986], 6 — рудні родовища. Мегаблоки: Инг — Інгульський, Рос — Росинсько-Тикицький, Спд — Середньопридніпровський. Шовні зони: Гл — Голованівська, І-Кр — Інгуло-Криворізька.

Fig. 1. Position of the Korsun-Novomirgorod pluton in the tectonic structures of the central part of the Ukrainian shield: 1 — Ingulo-Inguletskaya series, 2 — granitoids, 3 — rapakivi granites and anorthosites of the Korsun-Novomirgorod pluton, 4 — fault zones, 5 — isohypses of the Moho surface [Sollogub, 1986], 6 — ore deposits. Megablocks: Инг — Ingul'sky, Рос — Rosyn'sko-Tykit'sky, Спд — Sredn'oprydniprov'sky. Suture zones: Гл — Golovanivska, І-Кр — Ingulo-Krivoriz'ka.

п'езокварцової сировини, дорогоцінної та декоративного каменю [Митрохин, 2011].

Корсунь-Новомиргородський плутон розташований у палеопротерозойському Інгульському мегаблоці Українського щита. Із заходу до нього примикає Голованівська, зі сходу — Інгулецько-Криворізька шовні зони (рис. 1). Інгульський мегаблок займає центральне положення на Українському щиті і поділяє щит на два сектори з різними розрізами земної кори та різною морфологією поділу Мохо. У західному секторі кора граніт-діоритового типу і рельєф поділу Мохо більш диференційований, у східному секторі кора гранітного типу і рельєф поділу Мохо спокійніший. Границя між західним і східним секторами збігається з трансрегіональним тектонічним швом Херсон—Смоленськ.

Для Інгульського мегаблока характерна знижена порівняно з суміжними шовними зонами потужність сіалічної кори і відповідно більш високе положення поділу Мохо. Товщина кори в Інгульському мегаблоці змінюється від 35 до 46 км, у Голованівській шовній зоні — від 50 до 65 км, в Інгулецько-Криворізькій шовній зоні — від 45 до 52,5 км (рис. 2). Обидві шовні зони характеризуються підвищеними значеннями густини (основності) порід у всьому розрізі кори та наявністю в її нижній частині «коромантійної суміші» [Казанский и др., 2012].

Стратифікований палеопротерозойський комплекс Інгульського мегаблока представлений інгуло-інгулецькою серією. Її потужність становить 10—15 км, вікові межі — 2,3 і 2,1 млрд років. Вона складена теригенними і вулканогенними породами, метаморфізованими в умовах амфіболітової фази і перетвореними в біотитові гнейси зі змінними кількостями гранату, амфіболів, графіту, піроксенів. Відмінна риса Інгульського мегаблока — потужний і контрастний прояв палеопротерозойського (2,1—1,65 млрд років) магматизму у вигляді Корсунь-Новомиргородського і Новоукраїнського гранітоїдних масивів. Перший більш молодий масив має площу

близько 5000 км², представлений породами габро-анортозитової та рапаківі-гранітної формації та має мантійно-корове походження. Другий площею близько 3500 км² складений породами діорит-монцонітової та гранітово-мігматитової формації та згідно з петрологічними даними належить до анатектичних корових інтрузій. Обидва масиви приурочені до осьового підняття стратифікованої інгуло-інгулецької серії [Митрохин, 2011].

Граніти рапаківі в районі плутону утворюють два великі масиви — Корсунь-Шевченківський і Шполянський. Порооди анортозитів і габроїдів утворюють чотири великі масиви: Новомиргородський, Смілянський, Городищенський і Межиричанський (див. рис. 2). Габро-анортозитові масиви порушені диференційованими інтрузіями титаноносних норитів (наприклад, Носачівський), а також дайками монцонітів і монцодіоритів. Характерною особливістю Корсунь-Новомиргородського плутону є значний розвиток гібридних порід, які розвинені на контактах гранітів рапаківі з габроїдами, демонструючи яскраві ознаки магматичного змішування гранітоїдного та базитового розплавів, які свідчать про можливість їх синхронного вторгнення [Митрохин, 2011].

Вивченість габроїдних масивів Корсунь-Новомиргородського плутону за сейсмічними даними. Корсунь-Новомиргородський плутон, де розташоване Носачівське ільменітове родовище, досить детально вивчений сейсмічними методами різної модифікації. Кожен із відпрацьованих методів має як свої переваги, так і недоліки, пов'язані з фізичними характеристиками типів хвиль, що використовуються (див. рис. 2). Завдяки застосуванню методу ГСЗ вдалося дослідити морфологію поділу Мохо. Надійна ідентифікація заломлених і відбитих хвиль від підшови кори дала можливість з достатньою точністю визначити товщину кори, яка є одним з основних критеріїв глибинного тектонічного районування, а виділення відбиваючих границь і їх фрагментів в корі — вивчити її тонкошарову структуру. Крім того, побудова

розріз $V(x, z)$ дозволила встановити певні закономірності в розподілі швидкісних параметрів по всій товщині кори як за глибиною, так за площею, без чого неможливо вирішити проблеми її речовинного складу [Дрогицька, 2012].

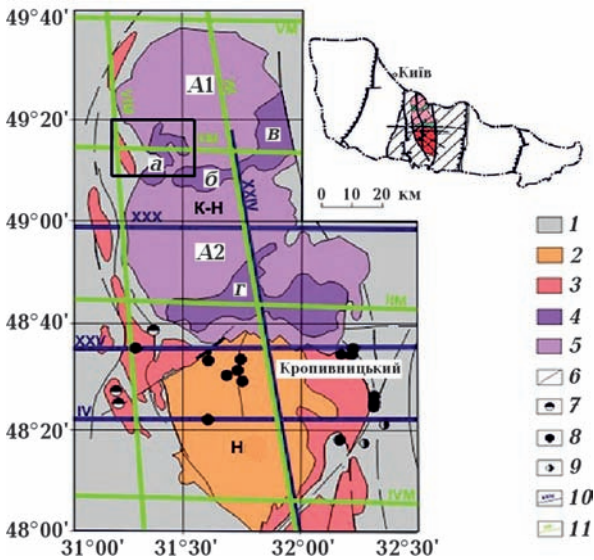


Рис. 2. Сейсмічна вивченість Корсунь-Новомиргородського плутону: 1 — інгуло-інгулецька серія; 2, 3 — Новоукраїнський масив трахітоїдних гранітів (Н) (2 — діорит-монзонітова формація, 3 — граніт-мігматитова формація); 4, 5 — Корсунь-Новомиргородський масив (К-Н) (4 — габро-анортозитова формація, 5 — рапаківі-гранітна формація); 6 — розломи; 7—9 — родовища та рудопрояви (за матеріалами КП «Кіровогеологія») літію (7), урану (8), золота (9); 10 — профілі ГСЗ та їх номери; 11 — профілі МОХЗ та їх номери. Виділений прямокутник — ділянка досліджуваного району. Масиви рапаківіподібних гранітів: А1 — Корсунь-Шевченківський, А2 — Шполянський. Масиви габро-анортозитів: а — Городищенський, б — Смілянський, в — Руськополянський, г — Новомиргородський

Fig. 2. Seismic study of the Korsun-Novomirgorod pluton: 1 — Ingulo-Inguletska series; 2, 3 — New Ukrainian massif of trachytoid granites (Н) (2 — diorite-monzonite formation, 3 — granite-migmatite formation); 4, 5 — Korsun-Novomirgorod massif (К-Н) (4 — gabbro-anorthosite formation, 5 — rapakivi-granite formation); 6 — faults; 7—9 — deposits and ore occurrences (based on materials from КП «Kirovgeology») lithium (7), uranium (8), gold (9); 10 — DSS profiles and their numbers; 11 — MCWE profiles and their numbers. Dedicated rectangle — section of the study area. Massifs of rapakivi granites: A1 — Korsun-Shevchenkivskiy, A2 — Shpolianskiy. Massifs of gabbro-anorthosite: a — Horodyshchensky, b — Smilyansky, v — Ruskopolyansky, g — Novomyrhorodsky.

Основним результатом застосування МОХЗ стало отримання такої об'єктивної характеристики земної кори, як розподіл точок обміну, що виражає ступінь її гетерогенності і опосередковано фіксує ступінь складності геологічних процесів, які призводять до формування тих чи інших блоків і структур.

У межах Корсунь-Новомиргородського рапаківі-анортозитового масиву встановлено дві аномальні області обміноздатності. Перша площею приблизно 80—85 км, охоплює майже весь масив, досягаючи максимальних значень (80 % і більше) на глибині 9—10 км на широті Городищенського і Смілянського габро-анортозитових масивів (рис. 3, А). Аномалія асиметрична, вона протягується на північ за межі контакту з гнейсами інгуло-інгулецької серії, а на півдні за XXV профілем різко затухає. На поверхні вона збігається з областю розповсюдження інтрузивного комплексу плутону, а її потужність може маркувати максимальну глибину занурення цього комплексу. Другу аномалію виявлено на глибині 40 км, у перехідній зоні кора—мантія (рис. 3, Б). Вона має ізометричну форму, менші розміри, але таку саму інтенсивність. Поверхнева і глибинна аномалії обміноздатності Корсунь-Новомиргородського масиву розділені між собою за вертикаллю. Тому контури масиву, що спостерігаються на поверхні, не слід без корекції проєціювати нижче 20 км. Крім того, незрозуміло, чи пов'язана глибинна аномалія з безпосереднім продовженням рапаківі-анортозитового масиву, чи вона є відображенням раніше існуючого магматичного осередку [Дрогицька, 2012].

Отримані дані можуть бути незалежним підтвердженням зв'язку Корсунь-Новомиргородського рапаківі-анортозитового масиву з підкоровими джерелами та процесами.

Підходи до гравітаційного моделювання. Гравітаційне моделювання або метод підбору включає цілу групу методичних застосувань. Їх сутність полягає в підборі форми і параметрів збудовуючих об'єктів шляхом послідовних наближень розрахун-

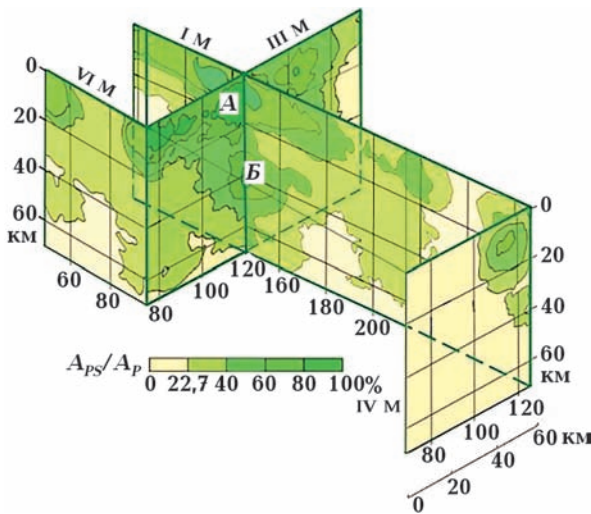


Рис. 3. Блок-діаграма обміноздатності середовища в ізолініях A_{PS}/A_P , A_{PS}/A_P — відношення амплітуд обмінної хвилі до поздовжньої хвилі, що її збудила.

Fig. 3. Block diagram of convertability of environment by MCWE in isolines A_{PS}/A_P , A_{PS}/A_P — ratio of the converted wave amplitude to the same of P -wave.

кової кривої до спостереженої аномалії за допомогою багаторазового розв'язування прямої задачі. Методи підбору та регуляризації розв'язку вперше були теоретично обґрунтовані в роботі [Тихонов, 1943]. Гравітаційне моделювання широко використовується українськими вченими при вирішенні великої кількості геолого-геофізичних завдань [Болюбах, 1972; Булах и др., 1976; Старостенко, Заворотько, 1976; Красовский, 1989; Старостенко и др., 2000; Бурьянов и др., 2000; Куприенко и др., 2007; Макаренко та ін., 2021], а також вченими з інших країн [Li, Oldenburg, 1998; Huston et al., 1999; Martin-Atienza, Garcia-Abdeslem, 1999; Долгаль, 1999; Moraes, Hansen, 2001]. Зрозуміло, що наведений список далеко не повний. Досить відзначити такі основні школи, що розвивають та активно використовують методи моделювання: Є.Г. Булаха [Булах, 2010], С.С. Красовського [Красовский, 1989; Красовский и др., 2001], О.І. Кобрунова [Кобрунов, 2005, 2006], О.П. Петровського [Петровский и др., 2000], В.І. Старостенка [Старостенко, Заворотько, 1976; Старостенко, 1978] та багатьох інших. Зазвичай ті чи інші методи реалізуються в пакетах програм з інтерпретації гравірозвідувальних або магніторозвідувальних даних як окремо, так і

в комплексі [Міхесєва та ін., 2022]. Як відомо, метод підбору використовують тільки тоді, коли дослідник може скласти схему-гіпотезу геологічної будови досліджуваного району. При цьому достовірність моделювання залежить від тих геологічних уявлень, які використовуються в процесі інтерпретації. Методика і технологія моделювання у різних дослідників дуже різна, але обов'язковим є розрахунок у межах тих чи інших модельних уявлень при жорсткому закріпленні значень деяких параметрів середовища, що вивчається. Рішення завжди шукається у межах тих модельних уявлень, які обрано основою першого наближення. Якщо початкові уявлення помилкові, то й розрахована модель також буде помилковою, хоча розрахунковий ефект від неї може і збігатися із спостереженим полем. Гравітаційне моделювання починається з побудови фізико-геологічної моделі об'єкта, що вивчається, за наступною схемою. Аналізуються та узагальнюються фізичні властивості гірських порід, які складають геологічний розріз. На основі геолого-геофізичних даних створюється модель першого наближення будови геологічного об'єкта, що вивчається. Шляхом послідовного наближення, змінюючи геометричні та фізичні параметри об'єкта та вміщуючого середовища, визначається остаточна модель об'єкта та проводиться оцінювання її достовірності. Важливе значення має відповідність інтерпретаційної моделі реальному геологічному об'єкту [Долгаль, 1999; Кобрунов, 2005]. Шлях до відповідності пролягає через уточнення фізико-геологічних уявлень про структури, що вивчаються і ретельне вивчення фізичних властивостей гірських порід. На зміну типовим технологіям, що претендують на універсальність, повинні прийти «штучні» інтерпретаційні моделі, адаптовані до конкретних умов. Широко розвинені методи сейсмогравітаційного моделювання, які включають технології спільного вирішення обернених задач сейморозвідки та гравірозвідки. Автори публікацій [Кобрунов, 2005; Петровский и др., 2000] ввели поняття пасивної та активної інтегральної інтерпретації. У моделі пасивної

інтегральної інтерпретації передбачається, що дані інших методів вводяться в процедури розв'язку обернених задач — визначення кількісних параметрів моделі середовища, у вже проінтерпретованій формі, що забезпечує використання вже існуючих напрацювань, аналізу даних інших методів, проте не дає можливості оперативного критичного перегляду процесу автоматизованої інтерпретації апріорних даних та моделі початкового наближення. Модель активної інтегральної інтерпретації передбачає використання методів і технологій спільного розв'язання кількох різних обернених задач. Наприклад, спільного розв'язання обернених задач сейсморозвідки та гравірознавства. Такий підхід забезпечує можливість динамічного коригування результатів кількох методів, але викликає певні складнощі із запровадженням самого поняття розв'язку та узгодження модельних даних. Обернена задача може бути розв'язана за двома схемами. У першій після зіставлення полів дослідник самостійно приймає рішення про можливі зміни параметрів моделі. Такий підхід можна назвати простим геологічним моделюванням. У цьому разі необхідно мати математичне забезпечення для ефективного розв'язання прямих задач. За другою схемою геологічна модель першого наближення уточнюється в автоматизованому режимі. І тут для зіставлення двох аномальних полів складаються певні функціонали. Інтерпретаційне завдання зводиться до мінімізації цих функціоналів [Булах, 2010]. Отже, метод підбору дуже тісно пов'язаний з проблемою параметризації геологічної моделі. Згідно з О.І. Кобруновим [Кобрунов, 2001], параметризація геологічного середовища передбачає попереднє формування її змістовної чи ефективної моделі, в характеристику якої входить перелік параметрів із виділеним діапазоном їх зміни. Кожному конкретному набору значень параметрів відповідає конкретний елемент моделі, а йому відповідає конкретне геофізичне поле. Таким чином, модель середовища це параметризоване різноманіття допустимих елементів, а виділення з нього конкретного еле-

мента, що відповідає заданому полю (тобто розв'язанню оберненої задачі), відповідає підбір відповідного значення виділеного різноманіття параметрів. Звідси випливає, що параметризація займає центральне місце у процесі вилучення інформації з геофізичних даних. Методам підбору загалом властива багатозначність прийнятних варіантів розв'язання обернених задач і відповідно значний суб'єктивізм, тому вирішальним тут повинно бути врахування всієї сукупності різної апріорної геологічної, петрологічної, геофізичної інформації для вибору моделі початкового наближення, а програмне забезпечення повинно застосовуватись відповідно до особливостей досліджуваного середовища.

Теоретичні обґрунтування використаних алгоритмів інтерпретації. Комп'ютерна технологія автоматизованої системи інтерпретації геофізичних даних на основі методу підбору часто використовується в практиці геологічної інтерпретації гравіметричних і магнітометричних даних. При цьому можна врахувати всі апріорні відомості про геологічну будову району, який вивчається. Інтерпретатор застосовує дві частини даних.

I. Нехай задано поле $U_{\text{вих}}(x, y, z)$ або $U_{\text{вих}}(x, y)$. Під функцією $U_{\text{вих}}(x, y, z)$ розумітимемо поле сили тяжіння, його похідні або спеціально побудовані трансформанти. Тепер у заданому полі виберемо n найбільш характерних точок і запишемо

$$U_{\text{вих}}(x_i, y_i, z_i) = U_{\text{вих}}(i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Це перша частина початкових даних.

II. Інтерпретатор аналізує спостережуване поле, вивчає всі апріорні відомості про будову району та вибирає початкову геологічну модель. З цього моменту інтерпретаційне завдання виконується у вибраному модельному класі. Кожен клас описується лише відповідною сукупністю параметрів. Серед них вибираються такі, чисельні значення яких можна змінювати. Ці параметри згруповані у вигляді вектора, що містить m параметрів, які представлені так:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$$

або

$$P = \{p_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Одержимо другу частину даних.

Якщо побудовано модель і задані її параметри, то можливо розв'язати пряму задачу. У вибраних точках обчислюється теоретичне поле

$$U_t(x_i, y_i, z_i, P) = U_t(i, P), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Тут особливо підкреслюється обставина, що теоретичне поле визначається параметрами моделі.

Функції, записані в рівностях (1) і (3), зіставляються між собою. Модель можна змінити, варіюючи чисельними значеннями її параметрів — вектор (2). Необхідно знайти або підібрати такі значення $\{p_j\}$, які мінімізують нев'язки між функціями (1) та (3). За розв'язок інтерпретаційної задачі буде прийнято елемент $P^* = \{p_j^*\}$ із запису (2), для якого нев'язка між вихідним і теоретичним полями досягає мінімуму.

З одного боку, відомо лише наближене значення $U_{\text{вих}}$. З іншого — геологічна модель майже ніколи не відображає всієї складності будови геологічного середовища. Таким чином, нев'язка не може прийняти нульового значення. Елемент P^* є квазірозв'язком поставленої задачі.

Найчастіше використовується квадратична метрика L_2 , оскільки допускається, що випадкові похибки у вхідних даних розподілені за нормальним законом (законом Гауса) з нульовим математичним очікуванням, тоді мінімізують цільову функцію:

$$F^{(1)} = F^{(1)}(P) = \sum_{i=1}^n a_i [U_n(i) - U_t(i, P)]^2, \quad (4)$$

$$F^2 = \|U_n - U_t\|_{L_2}^2, \quad (5)$$

де a_i — сукупність вагових множників, які є наперед заданими, або розраховуються в процесі розв'язку задачі і є пропорційними абсолютним значенням нев'язок поля; $U_n(i)$ — спостережене поле, $U_t(i, P)$ — теоретичне поле, обумовлене параметрами складеної геологічної моделі. Такий підхід дає змогу покращити збіжність ітерацій-

ного обчислювального циклу мінімізації функціоналу. За своєю структурою функціонал (4) може мати яружну будову, тоді для процесу мінімізації використовується функціонал такого виду:

$$F^{(3)} = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left| \frac{U_n(i)}{U_t(i, P)} \right| \right]^2. \quad (6)$$

Якщо функціонал $F^{(1)}$ дуже яружний, то в $F^{(3)}$ його структура згладжується і процес мінімізації стає значно простішим. Залежно від характеру вхідних даних використовуються різні цільові функції (функціонали) [Булах, 2010].

Клас стрижневих тіл. Запропоновано апроксимаційну конструкцію, яка представлена набором тривимірних стрижневих тіл. Орієнтація стрижнів узгоджена з координатними осями. Центр симетрії кожного тіла може змінювати місце розташування. При розв'язанні задачі центри симетрії тіл можуть визначати положення геометричних центрів досить складних фігур. Тристрижнева апроксимація дає можливість краще описати інтегральні характеристики геологічної моделі, про це свідчать численні модельні розрахунки, проведені співробітниками відділу нафтогазової геофізики Інституту геофізики НАН України [Булах, Шиншин, 2000; Булах, Лапина, 2002]. У цьому модельному класі розв'язано прямі та обернені задачі гравіметрії для двовимірного (2D) і тривимірного (3D) варіантів досліджень.

Тривимірна модель. Задано гравітаційне поле

$$\Delta g_n(x_i, y_i, z_i) = \Delta g_n(i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Потрібно знайти таку функцію $\phi(x, y, z)$ — гладку, принаймні двічі диференційовану, якою можна апроксимувати спостережене поле (4—6).

Вибрано прямокутну систему координат, її початок розташовано на земній поверхні, вісь Oz спрямована вертикально вниз, тоді площина xOy збігається із землею поверхнею, якщо вона горизонтальна. Початкове поле (4) представлено полем де-

якої сукупності елементарних тіл (рис. 4). Кожне тіло складається з трьох взаємно перпендикулярних матеріальних стрижнів, що перетинаються. Точка перетину — центр симетрії тіла. Кожен стрижень витягнутий у напрямку координатної осі.

Загальну геологічну модель визначено такою послідовністю параметрів:

$$P = \left\{ m, (c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)_j \right\}, \\ j = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

де m — кількість елементарних тіл, (c_x, c_y, h) — центри тяжіння тіл, $(2t_x, 2t_y, 2t_z)$ — довжини стрижнів, $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$ — надлишкові лінійні маси тіл. Якщо площа поперечного перерезу тіла ΔS_j , то $\lambda_j = \sigma_j \Delta S_j$, $j = 1, 2, \dots, m$, де σ_j — об'ємна надлишкова густина.

Результати досліджень. Обчислення поля, обумовленого апроксимаційною моделлю — сукупністю стрижнів. Інтерпретація будь-якої геофізичної інформації починається з вибору моделі середовища, ступінь достовірності цієї моделі першого наближення залежить насамперед від рівня апіорної геологічної інформації, яка включає знання про фізичні параметри порід досліджуваного району, особливості його внутрішньої структури, характер контактів порід різного літологічного складу. Вивченість Корсунь-Новомиргородського плутону недостатня, тому відомості про фізичні властивості складових його порід і характер їх контакту всередині інтрузиву із вмисними породами були доповнені даними, отриманими 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—2,60 г/см³. Основні породи, що входять до інтрузивного комплексу плутону, різноманітні за складом і відповідно характеризуються широким діапазоном зміни фізичних характеристик. 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 (з густиною 2,72 г/см³), габро-анортозити (2,79 г/см³) і габро-діабази (2,93 г/см³). Відсутність інформації про літологічний склад масиву на глибині ускладнює вибір середньої густини. Для Корсунь-Новомиргородського плутону вмисючими породами є гнейсо-мігматити інгуло-інгулецької серії. Здебільшого це біотитові гнейси з густиною 2,65 г/см³, а також прошарки мігматитів із густиною 2,6 г/см³.

Інтерес представляє характер контакту основних порід та гранітів рапаківі всередині інтрузиву. У районі Коростенського плутону такий контакт вскрито свердловиною Юрово-2 [Митрохин, 2011]. Він являє собою складну перехідну зону, де основні і кислі породи були піддані переробці, і тому фізичні властивості порід, що контактують, змінюються поступово, контакт не є різкою сейсмічною границею. У зв'язку з цим поділ порід основного та кислого складу у розрізі плутону з використанням лише сейсмічної інформації зазнає значних труднощів. Тому логічним було для вирішення цієї проблеми долучити гравітаційне моделювання.

Моделювання виконувалося методом автоматизованого підбору з використанням гравіметричних матеріалів зйомки 1:200 000 масштабу з перетином ізонамалій 2 мГал і середньоквадратичною похибкою визначення аномалій Буге цієї зйомки близько 0,8 мГал.

На рис. 5, а представлено карту аномалій сили тяжіння ділянки досліджень розміром 20×31 км. Для підкреслення аномального ефекту від порід інтрузивного комплексу було враховано вплив оточуючих порід за допомогою поліному другого порядку. Фоновий вплив, зумовлений наявністю гранітів рапаківі та гнейсів інгуло-інгулецької світи, які є меншими за густиною порівняно з габро-анортозитами, представлено на рис. 5, б.

В аномальному полі зафіксовано $n=620$ точок. Аналізуючи наявну апіорну інформацію, побудовано модель початко-

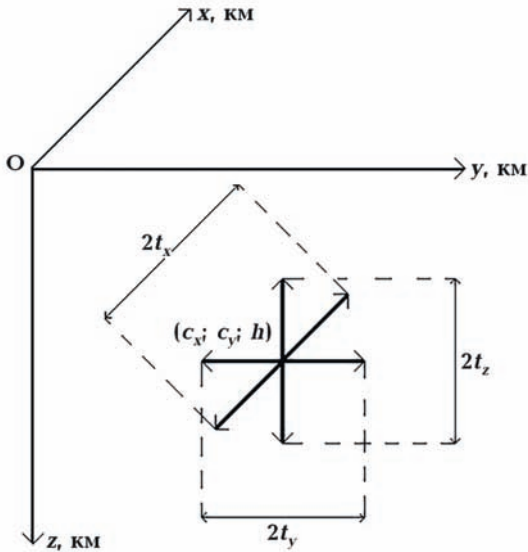


Рис. 4. Схема для опису тристрижневої моделі.
Fig. 4. Diagram for describing the three-stripe model.

вого наближення, що складається з $m=95$ елементарних об'єктів. Як апроксимуючі осередки обрано тривимірні стрижневі тіла. Спочатку джерела розташовані на глибині $h=2$ км. Зважаючи на наявну апіорну інформацію по всій ділянці досліджень при виборі початкової моделі задавалася залишкова густина $-0,05$ г/см³ для гранітів рапаківі відносно вмісних гнейсів і $+0,2$ г/см³ для анортозитів. На початку ітераційного циклу отримано значення функціоналу $F_0=39166,594$ мГал². У процесі розв'язання задачі застосовувалися різні методичні прийоми: моделювання об'єктів при різних варіантах закріплення параметрів моделі, підбиралися як фізичні, так і геометричні параметри; при різних режимах роботи програми, вирішення однієї і тієї ж задачі з різними початковими наближеннями. По деяких профілях проведено двовимірне гравітаційне моделювання, як геологічні моделі були використані розрізи, побудовані за сейсмічними даними. Для оптимального розв'язку задачі вибрано значення середнього відхилення (Δ_{cp}) між вихідним і теоретичним полем. У результаті розв'язку виконано 130 ітерацій, значення функціоналу становить $F=153,27895$ мГал², значення середнього відхилення дорівнює $\Delta_{cp}=0,26989$. Отрима-

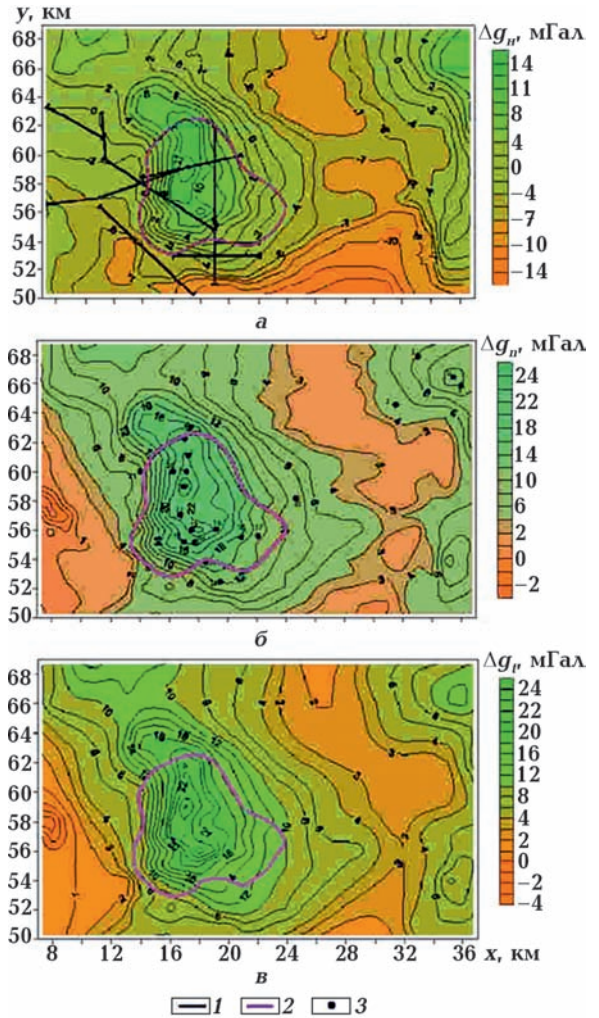


Рис. 5. Ділянка району досліджень. Городищенський габро-анортозитового масив Корсунь-Новомиргородського плутону: а — карта ізодинам спостереженого гравітаційного поля Δg_n , мГал; б — карта ізодинам спостереженого гравітаційного поля Δg_n з виключеним фоновим впливом, мГал; в — результати розв'язання тривимірної оберненої задачі гравіметрії: карта ізодинам гравітаційного поля Δg_n , обумовленого апроксимаційною моделлю, мГал; 1 — сейсмічні профілі; 2 — контур масиву габро-анортозитів; 3 — розташування центрів тяжіння елементів апроксимаційної конструкції.

Fig. 5. Site in the tri-core research area. Gorodyshchensky gabbro anorthosite massif of the Korsun-Novomirgorodsky pluton: a — isodynamic map of the observed gravitational field Δg_n , mGal; б — isodynamic map of the observed gravitational field with the background influence excluded Δg_n , mGal; в — results of solving the three-dimensional inverse problem of gravimetry: map of isodynamics of the gravitational field Δg_n , determined by the approximation model, mGal; 1 — seismic profiles; 2 — contour of the gabbro-anorthosite massif; 3 — location of the centers of the elements of the approximation structure.

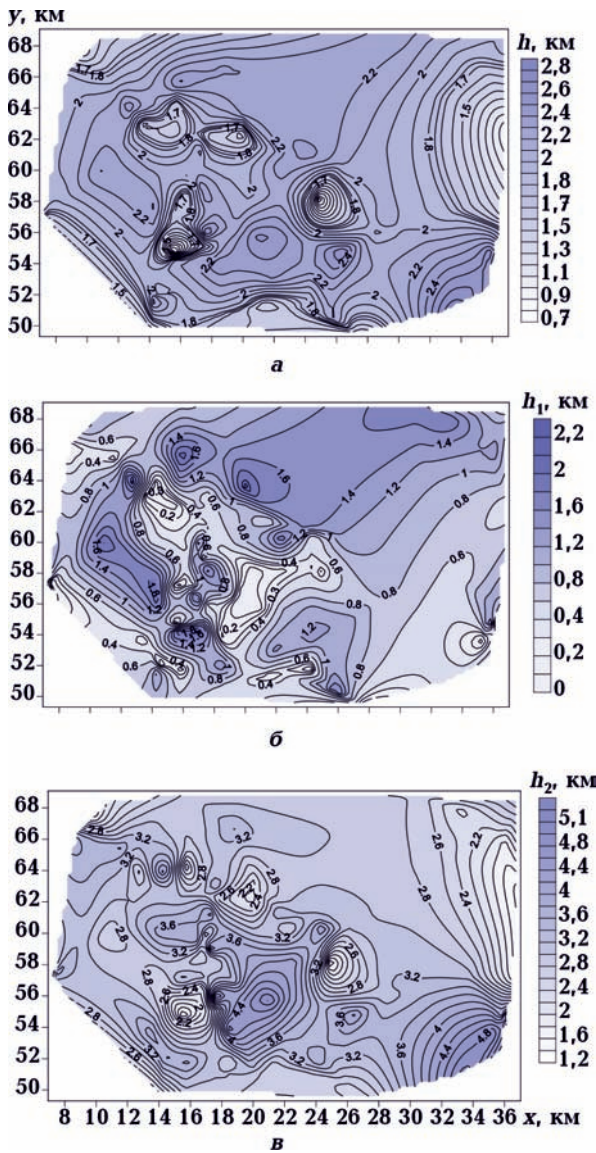


Рис. 6. Карти-схеми ізогіпс глибин залягання: *а* — центрів тяжіння елементів апроксимаційної моделі, км, *б* — верхньої кромки елементів апроксимаційної моделі, км, *в* — нижньої кромки елементів апроксимаційної моделі, км.

Fig. 6. Maps diagrams of isohypses of the depths of the deposit: *a* — centers of gravity of the elements of the approximation model, km, *b* — upper edges of the elements of the approximation model, km, *v* — lower edges of the elements of the approximation model, km.

но модель, яка найточніше дозволяє описати вихідне аномальне поле.

У таблиці наведено параметри геологічної моделі, представлені найбільш інформативними тілами. Глибина розташування збудуючих об'єктів досягає 5,18 км, при

цьому верхня кромка варіює від 0,04 до 0,48 км, нижня кромка — від 1,11 до 5,18 км, глибини центрів тяжіння збудуючих джерел — від 0,6 до 2,84 км, значення надмірної густини розподіляються в інтервалі від $-0,1$ до $0,3$ г/см³. Результати використано для побудови карти ізодинам теоретичного поля (рис. 5, в) у площині xOy . На рис. 6 наведено схеми верхньої, нижньої кромки підібраних джерел та ізогіпси глибини залягання центрів тяжіння відповідно. На рис. 7 — карту-схему геологічної будови Городищенського габро-анартозитового масиву та карту-схему ізогіпс глибин нижньої кромки і розташування 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. Отже, побудовану модель геогустинного розрізу, яка базується на використанні всієї наявної апріорної інформації про петрогустинні та геометричні параметри аномалієзбудуючих об'єктів, можна використовувати для отримання достовірної геологічної інформації про будову габро-анартозитового масиву, розташованого на досліджуваній ділянці. Отримано апостеріорну інтерпретаційну модель розподілу густинних неоднорідностей, що задовольняє як спостережене поле, так і апріорну геологічну інформацію.

Підібрана модель в результаті розв'язання оберненої задачі з використанням стрижневої апроксимаційної конструкції відповідає моделі, яка залягає на глибині 4,5 км. На схід потужність основних порід зменшується. Встановлено, що розрізнені тіла основних порід у районі Городищенського масиву за густинними та геологічними параметрами єдині за глибиною.

Таким чином, у районі Городищенського габро-анартозитового масиву за сейсмічними даними [Дрогицкая, Шимкив, 1986] визначено межі поширення інтрузивного комплексу, а гравітаційне моделювання дало змогу оконтурити в розрізі масив порід основного складу.

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

Надлишкова густина, г/см ³			Довжини стрижнів, км			Координати центру тяжіння, км			Глибина верхньої кромки, км	Глибина нижньої кромки, км
λ_x	λ_y	λ_z	t_x	t_y	t_z	c_x	c_y	h	h_1	h_2
2,99	2,99	2,89	4,1	2,9	0,2	33,1	67,9	2,0	1,8	2,2
2,89	2,89	2,89	1,8	1,0	0,5	35,4	66,4	1,6	1,1	2,1
2,99	2,89	2,89	2,2	0,7	0,2	36	65,9	1,5	1,3	1,7
2,79	2,79	2,89	0,5	0,4	1,5	17,6	63,0	1,9	0,4	3,4
2,79	2,79	2,79	1,6	1,6	0,8	31,5	64,7	1,9	1,1	2,7
2,89	2,89	2,79	1,1	0,9	1,2	17,0	62,3	1,8	0,6	3,0
2,79	2,89	2,79	0,7	1,2	1,8	17,2	61,3	2,2	0,4	3,0
2,79	2,89	2,69	0,5	0,9	0,6	17,1	60,0	2,1	1,5	2,7
2,79	2,79	2,89	1,1	1,0	1,8	17,3	59,0	2,3	0,5	4,1
2,79	2,78	2,79	1,2	1,3	0,7	24,8	58,1	0,9	0,2	1,6
2,89	2,89	2,89	1,0	0,9	1,4	16,7	57,2	1,7	0,3	3,1
2,79	2,79	2,89	1,1	0,9	2,3	17,6	56,0	2,6	0,3	4,9
2,79	2,79	2,79	1,0	1,2	2,35	18,4	53,9	2,4	0,05	4,75
2,89	2,89	2,89	1,8	1,7	1,6	19,6	52,5	2,1	0,5	3,7
2,79	2,82	2,89	1,17	1,25	2,14	19,4	56,0	2,15	0,01	4,29
2,78	2,79	2,78	1,38	1,46	2,52	21,0	55,77	2,54	0,02	5,07
2,79	2,82	2,79	1,42	1,55	1,69	22,35	55,71	2,46	0,7	4,16
2,79	2,78	2,79	0,86	0,63	0,77	17,1	55,18	1,51	0,75	2,28
2,79	2,80	2,81	0,81	0,86	1,27	17,8	55,10	1,85	0,59	3,12
2,79	2,80	2,83	0,48	0,83	1,77	16,3	59,7	2,10	0,3	3,88
2,77	2,79	2,80	0,27	0,12	1,62	14,0	60,0	2,10	0,48	3,72

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

Висновки. Зроблено першу спробу застосування тривимірного алгоритму гравітаційного підбору з використанням апроксимаційної моделі на реальному геологічному матеріалі. Габро-анартозитовий масив Корсунь-Новомиргородського плутону обрано не випадково. Плутон детально вивчений як геологічними, так і геофізичними методами. У районі західного його контакту — в Городищенському габро-анартозитовому масиві проведено детальні сейсмічні спостереження, це дало можливість визначити границі всього інтрузивну, включно з гранітами рапаківі та породами основного складу. Для поділу цих комплек-

сів, відмінних за густиною, було виконано тривимірне гравітаційне моделювання. Це дало змогу виділити у верхній частині розрізу тіла габро-анортозитів з максимальною товщиною до 5 км, уточнити форму та розміри гранітів рапаківі, вивчити контакти інтрузивного комплексу з гнейсами, що його вміщують.

При розв'язанні поставленої задачі встановлено різні критерії локальної оптимізації в процесі моделювання джерел гравітаційного поля. В ітераційному процесі обчислювалися три різні функціонали. Для зменшення мультиплікативної завади мінімізувалось максимальне співвідношення амплітуд полів у всіх точках вимірів.

Встановлено, що у всіх комбінаціях вибору критерію локальної оптимальності поточного наближення та вибору метрики, в якій оцінюється відносне значення

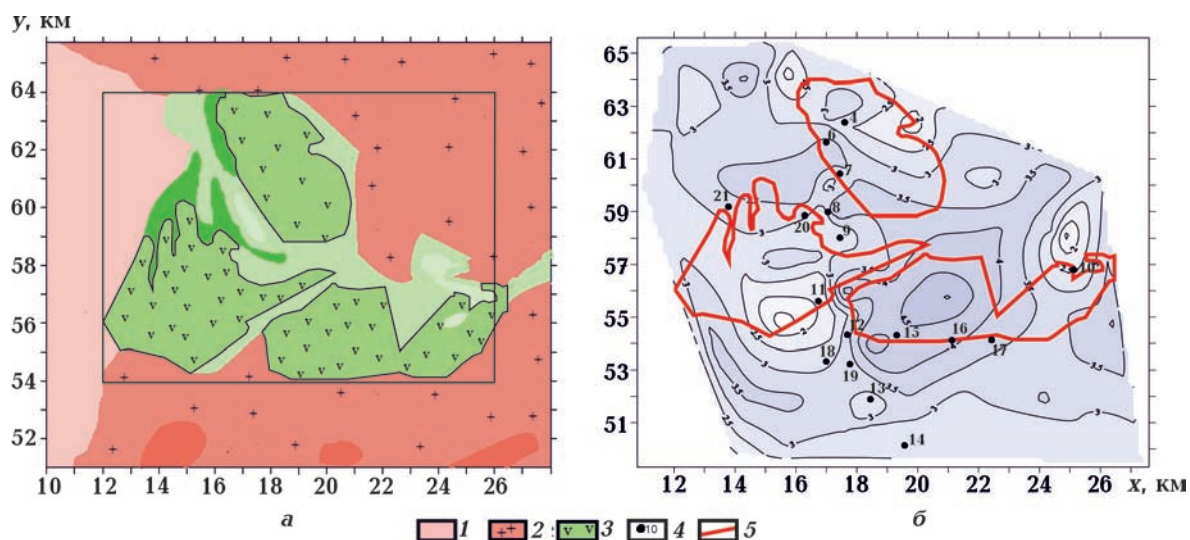


Рис. 7. Карта-схема: а — геологічної будови Городищенського габро-анортозитового масиву, б — карта-схема ізогіпс глибин залягання нижньої кромки апроксимаційної моделі, одержаної в результаті розв'язання оберненої задачі; 1 — гнейси, 2 — граніти рапаківі, 3 — габро-анортозити, 4 — розташування об'єктів підібраної моделі, 5 — контур габро-анортозитових тіл.

Fig. 7. Schematic map: а — geological structure of the Gorodyschchensky gabbro anorthosite massif; б — isohypsum map of the depths of the lower edge of the approximation model obtained as a result of solving the inverse problem; 1 — gneisses, 2 — rapakiva granites, 3 — gabbro-anorthosites, 4 — location of objects of the selected model, 5 — contour of gabbro-anorthosite bodies.

нев'язки, останнє змінюється в межах від 1 до 7 %. У процесі досліджень встановлено, що застосування різних типів функціоналів локальної оптимізації в алгоритмах методів підбору цілком доцільно. Це дозволяє у подальшому створювати нові алгоритми, що 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 дає змогу здійснити

зменшення різних видів завад у спостережених даних геопотенціальних полів.

Підібрана модель в результаті розв'язання оберненої задачі з використанням стрижневої апроксимаційної конструкції відповідає моделі, котра залягає на глибині 4,5 км. Встановлено, що розрізнені тіла основних порід у районі Городищенського масиву за густиною та геологічними параметрами єдині за глибиною. Таким чином, створена тривимірна модель досліджуваного середовища може бути розглянута як нова модель для інтерпретації над тілами рудних габроїдів, збагачених титановим зрудненням.

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, 464 с.
- Булах Е.Г., Лапина Е.П. Обратные задачи магнитометрии в классе стержневых тел в связи с построением аналитической модели исходного поля. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 4. С. 67—74.
- Булах Е.Г., Ржаницын В.А., Маркова М.Н. *Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравиразведки*. Киев: Наук. думка, 1976, 220 с.
- 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.
- Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Легостаева О.В. Трехмерное моделирование при изучении гравитационного эффекта осадочной толщи и плотностных неоднородностей фундамента Припятского прогиба. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского, ОИФЗ РАН.* Москва, 2000, С. 35—37.
- Галецький Л., Ремезова О. Титанові руди України. *Геолог України.* 2007. № 3. С. 51—61.
- Долгаль А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 4. С. 71—80.
- Дрогицкая Г.М. Построение 3D сейсмогеологической модели Кировоградского рудного района по данным обменных волн землетрясений. *Зб. наук. праць «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.
- Егоров В.М., Швайбаров С.К., Егорова Т.П., Заворотько А.Н. Гравитационное моделирование рудных габброидов Коростенского плутона. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 11. № 6. С. 74—81.
- Казанский В.И., Макивчук О.Ф., Попов Н.И., Дрогицкая Г.М., Старостенко В.И., Трипольский А.А., Чичеров М.В. Глубинное строение и металлогения Кировоградского полиметального рудного района (Украинский щит): корреляция геологических и сейсмических данных. *Геология рудных месторождений.* 2012. Т. 54. № 1. С. 22—48.
- Кобрунов А.И. О некоторых проблемных вопросах в теории интерпретации гравиметрических данных. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского, ГИ УрО РАН.* Пермь, 2005, С. 121—122.
- Кобрунов А.И. О содержательных и эффективных интерпретационных моделях в гравитазведке. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского, ИГ УрО РАН.* Екатеринбург, 2006, С. 136—141.
- Кобрунов А.И. Параметризация в математических моделях геологических сред и решение обратных задач. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.-семинара, ОИФЗ РАН.* Т. 2. Москва, 2001, С. 125—149.
- Красовский С.С. *Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия.* Киев: Наук. думка, 1989, 248 с.
- Красовский С.С., Куприенко П.Я., Красовский А.С. Гравитационное моделирование — задачи, проблемы, геологический результат. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.-семинара, ОИФЗ РАН.* Т. 2. Москва, 2001, С. 166—197.
- Кривдик С.Г., Дубина О.В., Гуравський Т.В. Деякі мінералогічні та петрологічні особливості рудоносних (фосфор, титан) габроїдів анортозит-рапаківігранітних плутонів Українського щита. *Мінерал. журн.* 2008. Т. 30. № 4. С. 41—57.
- 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.
- Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Легостаева О.П. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 2. С. 17—41.
- Макаренко І.В., Старостенко В.І., Купрієн-

- ко П.Я., Савченко О.С., Легостаєва О.В. *Неогнорідність земної кори України і суміжних регіонів за 3D гравітаційним моделюванням*. Київ: Наук. думка, 2021, 204 с.
- Митрохин А.В. Анортозит-рапакивигранитная формация Украинского щита (геология, вещественный состав и условия формирования): автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Киев, 2011.
- Міхеєва Т.Л. Лапіна О.П., Кишман-Лаванова Т.М. Причепий Т.И. Технології інтерпретації геофізичних даних при дослідженні та розвідці нафтогазових родовищ. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 5. С. 104—120.
- Петровский А.П., Кобрунов А.И., Суятин В.Н. Автоматизированная система GCI — количественной комплексной интерпретации данных сейсмогравиметрии для персонального компьютера. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского, ОИФЗ РАН*. Москва, 2000, С. 133—135.
- Проскурин Г.П. Объемная зональность апатитильменитового оруденения в габброидах Коростенского плутона. В кн.: *Вертикальная зональность магматогенных рудных месторождений*. Москва: Наука, 1984, С. 44—67.
- Соллогуб В.Б. *Литосфера Украины*. Киев: Наук. думка, 1986. 184 с.
- Старостенко В.И. *Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии*. Киев: Наук. думка, 1978, 228 с.
- Старостенко В.И., Заворотько А.Н. *Методика и комплекс программ решения обратной задачи гравиметрии на ЭВМ «Минск-22»*. Киев: Наук. думка, 1976, 62 с.
- Старостенко В.И., Легостаєва О.В., Заворотько А.Н. Решение обратной задачи гравиметрии для нескольких контактных поверхностей: автоматизированная реализация. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского, ОИФЗ РАН*. Москва, 2000, С. 173—174.
- Старостенко В.И., Казанский В.И., Попов Н.И., Дрогицкая Г.М., Заяц В.Б., Трипольский А.А., Чичеров М.В. Новые данные о металлогении и глубинном строении Кировградского полиметалльного рудного района (Украинский щит). *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 2. С. 3—17. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111318>.
- Тарасенко В.С. Критерии локального прогнозирования фосфатно-титановых руд в габбро-анортозитовых массивах Украинского щита. *Геол. журн.* 1988. № 6. С. 33—43.
- Тихонов А.В. Об устойчивости обратных задач. *Докл. АН СССР*. 1943. Т. 39. № 5. С. 195—198.
- Huston, N.H., Sestak, N., & Lyman, G.D. (1999). Methodology for interpreting 3D marine gravity gradiometry data. *The Leading Edge*, 18(4), 482—485. <https://doi.org/10.1190/1.1438315>.
- Li, Y., & Oldenburg, D.W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109—119. <https://doi.org/10.1190/1.1444302>.
- Martin-Atienza, B., & Garcia-Abdeslem, J. (1999). 2D gravity modeling with analytically defined geometry and quadratic polynomial density functions. *Geophysics*, 64(6), 1730—1734. <https://doi.org/10.1190/1.1444677>.
- Moraes, A.V.R., & Hansen, R.O. (2001). Constrained inversion of gravity fields for complex 3-D structures. *Geophysics*, 66(2), 501—510. <https://doi.org/10.1190/1.1444940>.

Gravity modeling of ore gabbroids Korsun-Novomirhorod pluton

T.L. Mikheeva, G.M.Drogitskay, O.P. Lapina, 2023

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

This work concerned three-dimensional gravity modeling of the Gorodishche gabbro-anorthosite massif located within the Korsun-Novomirgorod pluton of the Ukrainian Shield. A three-dimensional model of the upper crust was created using maps of the anomalous gravitational field at a scale of 1:200 000, taking into account data from seismic methods of various modifications. The differences in the structure of the intrusive complex and its gneisses were reflected in seismic wave fields, allowing us to determine the boundaries of the entire intrusive massif: rapakivi granites and basic rocks. Three-dimensional gravity was modeled to separate these complexes of different densities. This made it possible to identify gabbro-anorthosite bodies with a maximum thickness of 5 km in the upper part of the section, and to study the contacts of the intrusive complex and gneisses. In the process of solving inverse problems, various criteria for local optimization of gravitational field sources were implemented. In the iterative process, three different functionals were calculated. The mean square of the difference between the observed and theoretical fields is F_1 , the average sum of the moduli of the field difference is the functional F_2 , and the preliminary logarithm of the parameters is the functional F_3 . The joint use of functionals makes it possible to reduce various types of noise in the observed potential field data. In the process of research, it was found that the use of functionals of various types in the selection method algorithms is quite advisable. This makes it possible to create new algorithms that improve feasible solutions to the inverse problem, which is necessary for the implementation of additive technologies for the quantitative interpretation of gravity survey data. The constructed model, which takes into account all available a priori information about the density and geometric parameters of anome-forming objects, can be used to obtain additional reliable geological information about gabbro-anarthosite massifs.

Key words: pluton, gabbro-anorthosite massif, upper crust, three-dimensional gravity modeling, inverse problem, selection method.

References

- Bolyubakh, K.A. (1972). *Deep structure of the central regions of the Ukrainian Shield*. Kyiv: Naukova Dumka, 96 p. (in Ukrainian).
- Bulakh, E.G. (2010). *Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry*. Kiev: Naukova Dumka, 463 c. (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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 24(4), 67—74 (in Russian).
- Bulakh, E.G., Rzhanitsyn, V.A., & Markova, M.N. (1976). *Application of the minimization method for solving problems of structural geology based on gravity survey data*. Kiev: Naukova Dumka, 220 p. (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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 22(2), 107—114 (in Russian).
- Buryanov, V.B., Makarenko, I.B., Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (2000). Three-dimensional

- modeling in the study of the gravitational effect of sedimentary strata and density inhomogeneities of the basement of the Pripyat trough. *Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: materials of the 27th session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky, Moscow* (pp. 35—37) (in Russian).
- Galetsy, L., & Remezova, O. (2007). Titanium ores of Ukraine. *Geologist of Ukraine*, (3), 51—61 (in Ukrainian).
- Dolgal, A.S. (1999). Approximation of geopotential fields by equivalent sources when solving practical problems. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 21(4), 71—80 (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. *Collection of scientific works «Theoretical and applied aspects of geoinformatics»* (pp. 39—50) (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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 8(2), 76—82 (in Russian).
- Yegorov, V.M., Shvaibarov, S.K., Yegorova, T.P., & Zavorotko, A.N. (1989). Gravity modeling of ore gabbroids of the Korosten pluton. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 11(6), 74—81 (in Russian).
- Kazansky, V.I., Makivchuk, O.F., Popov, N.I., Drogitskaya, G.M., Starostenko, V.I., Tripolsky, A.A., & Chicherov, M.V. (2012). Deep structure and metallogeny of the Kirovograd polymetallic ore district (Ukrainian Shield): correlation of geological and seismic data. *Geology of ore deposits*, 54(1), 22—48 (in Russian).
- Kobrunov, A.I. (2005). On some problematic issues in the theory of gravimetric data interpretation. *Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: materials of the 32nd session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky, Permian* (pp. 121—122) (in Russian).
- Kobrunov, A.I. (2006). On meaningful and effective interpretive models in gravity exploration. *Issues in the theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: materials of the 33rd session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky, Ekaterinburg* (pp. 136—141) (in Russian).
- Kobrunov, A.I. (2001). Parameterization in mathematical models of geological media and solution of inverse problems. *Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: materials of the International school-seminar, Moscow* (pp. 125—149) (in Russian).
- Krasovsky, S.S. (1989). *Gravity modeling of deep crustal structures and isostasy*. Kiev: Naukova Dumka, 248 p. (in Russian).
- Krasovsky, S.S., Kuprienko, P.Ya., & Krasovsky, A.S. (2001). Gravity modeling — tasks, problems, geological result. *Issues in the theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: materials of the International school-seminar, Moscow* (pp. 166—197) (in Russian).
- Krivdik, S.G., Dubina, O.V., & Guravsky, T.V. (2008). Decades of mineralogical and petrological features of ore-bearing (phosphorus, titanium) gabbroids of anorthosite-rapaces of granite plutons of the Ukrainian Shield. *Mineralogical Journal*, 30(4), 41—57 (in Ukrainian).
- 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).
- Kuprienko, P.Ya., Makarenko, I.B., Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.P. (2007). Three-dimensional density model of the earth's crust and upper mantle of the Ingulmegablock of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 29(2), 17—41 (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).
- Mitrokhin, A.V. Anorthosite-rapaquigranite for-

- mation of the Ukrainian shield (geology, material composition and formation conditions). *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kiev (in Russian).
- Mikheeva, T.L., Lapina, O.P., Kishman-Lavanova, T.M., & Prychepii, T.I. (2022). Geophysical data interpretation technologies in the study and exploration of oil and gas deposits. *Geofizicheskii Zhurnal*, 44(5), 104—120 (in Ukrainian).
- Petrovsky, A.P., Kobrunov, A.I., & Suyatinov, V.N. (2000). Automated system GCIS — quantitative integrated interpretation of seismogravimetry data for a personal computer. Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: *materials of the 27nd session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky, Moscow* (pp. 133—135) (in Russian).
- Proskurin, H.P. (1984). Volumetric zoning of apatite-ilmenite mineralization in gabbroids of the Korosten pluton. In *Vertical zoning of magmatic ore deposits* (pp. 44—67). Moscow: Nauka (in Russian).
- Sollogub, V.B. (1986). *The lithosphere of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I. (1978). *Stability numerical methods in gravimetry problems*. Kiev: Naukova Dumka, 228 c. (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Zavorotko, A.N. (1976). *Methods and a set of programs for solving the inverse problem of gravimetry on the «Minsk-22» computer*. Kiev: Naukova Dumka, 62 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Legostaeva, O.V., & Zavorotko, A.N. (2000). Solving the inverse problem of gravimetry for several contact surfaces: automated implementation. In: Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: *materials of the 27nd session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky, Moscow* (pp. 173—174) (in Russian).
- Starostenko, V.I., Kazanskiy, V.I., Popov, N.I., Drozitskaya, G.M., Zayats, V.B., Tripolskiy, A.A., & Chicherov, M.V. (2013). New data on the metallogeny and deep structure of the Kirovograd Polymetal ore district (Ukrainian Shield). *Geofizicheskii Zhurnal*, 35(2), 3—17. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111318> (in Russian).
- Tarasenko, V.S. (1988). Criteria for local prediction of phosphate-titanium ores in gabbro-anorthosite massifs of the Ukrainian Shield. *Geological Journal*, (6), 33—43 (in Russian).
- Tikhonov, A.V. (1943). On the stability of inverse problems. *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 39(5), 195—198 (in Russian).
- Huston, H.H., Sestak, H., & Lyman, G.D. (1999). Methodology for interpreting 3D marine gravity gradiometry data. *The Leading Edge*, 18(4), 482—485. <https://doi.org/10.1190/1.1438315>.
- Li, Y., & Oldenburg, D.W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109—119. <https://doi.org/10.1190/1.1444302>.
- Martin-Atienza, B., & Garcia-Abdeslem, J. (1999). 2D gravity modeling with analytically defined geometry and quadratic polynomial density functions. *Geophysics*, 64(6), 1730—1734. <https://doi.org/10.1190/1.1444677>.
- Moraes, A.V.R., & Hansen, R.O. (2001). Constrained inversion of gravity fields for complex 3-D structures. *Geophysics*, 66(2), 501—510. <https://doi.org/10.1190/1.1444940>.