

Від ідеї до створення автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів GMT-AUTO: step by step

І.Б. Макаренко, О.В. Легостаєва, О.С. Савченко, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 26 січня 2025 р.

*Подорож довжиною в тисячу миль
починається з першого кроку.*

Лао-цзи

Викладено шлях створення автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів *GMT-Auto*, який складається з трьох етапів: 1995—2000 рр., 2001—2009 рр., 2010 р. — сьогодення. На кожному етапі роботи включали розв'язання прямих задач і створення програмних продуктів для вводу інформації, поданої у паперовому вигляді, та виводу отриманих даних у графічному форматі. В 1995—2000 рр. було наведено розв'язки прямої задачі гравіметрії для неоднорідної довільно усіченої вертикальної прямокутної призми та розроблено програми для розрахунку гравітаційних ефектів у прямокутній (*3D Gravity*) і сферичній (*Sfera*) системах координат. Створено програму *MAP*, яка орієнтована для роботи з картами, що не містять зображень функцій із розривами першого роду. Вдосконалено алгоритми та створено програмний комплекс, що дало можливість автоматично будувати геофізичні карти за значеннями поля в довільних точках площини. У 2001—2009 рр. розроблено програмний комплекс *Geophys0*, призначений для автоматизованої інтерактивної обробки чорно-білих зображень геолого-геофізичних даних, головним змістом яких є інформація щодо ізоліній і їх розривів першого роду (розломи, обриви і т.п.). У 2003 р. розв'язано прямі стаціонарні задачі геотермії про розподіл в однорідному півпросторі тепла і теплового потоку, що породжуються стаціонарним джерелом, яким слугує неоднорідна довільно зрізана вертикальна прямокутна призма. У 2005 р. подано строге розв'язання прямої задачі магнітометрії для довільно зрізаних вертикальної прямокутної призми і чотирикутної піраміди з анізотропною магнітною сприйнятливістю, яка всередині тіл задана як функція координат. У 2006 р. для розв'язання прямих задач гравіметрії, магнітометрії і геотермії було розроблено програмний комплекс *Profile*, в якому додатково реалізовано можливість врахування рельєфу місцевості. У 2009 р. для розв'язання прямої задачі магнітометрії запропоновано алгоритм обчислення магнітних полів для монокліналей складної форми і складчастих структур з однорідною анізотропією і створено програму *Magnitca*. Починаючи з 2010 р. на сьогодні виконано роботу зі створення інтерактивного програмного комплексу *Isohypse* для обробки монохромних (чорно-білих) і кольорових (оригінали карт) зображень об'єктів, поданих у прямокутній або географічній системі координат. У 2010—2011 рр. розроблено програму *SpaceMap*, що

Citation: Makarenko, I.B., Legostaeva, O.V., & Savchenko, O.S. (2025). From the idea to the creation of an automated interpretation system of potential fields GMT-AUTO: step by step. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 28—44. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.325253>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

дало змогу вводити у комп'ютер інформацію, подану графічно у вигляді тіл (областей). У 2015 р. був вдосконалений алгоритм програми *Sfera*, додано можливість задання глибини залягання покрівлі та підшви шару у вигляді як числа, так і файлу. В 2021 р. розпочато використання комплексу *GMT-Auto* для побудови густинних моделей вздовж лінії профілю. Наведено досвід практичного використання комплексу як для розв'язання задач регіонального плану, так і вирішення складних прикладних завдань сучасної геології.

Ключові слова: автоматизовані системи, потенціальні поля, автоматизація введення в комп'ютер геолого-геофізичних даних, прямі задачі геофізики, комплекс *GMT-Auto*, густинне моделювання.

Вступ. Історія створення автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів *GMT-Auto* має довгий шлях тривалістю в десятки років. Спробуємо відновити його крок за кроком. В основі будь-якої події, процесу і результату завжди лежить ідея — випадкова або детально обміркована людиною або групою людей. Все почалося з ідеї Віталія Івановича Старостенка про автоматизовані системи оброблення та інтерпретації гравіметричних і магнітометричних даних на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ), що досі є одним із актуальних напрямків сучасної геофізики.

Застосування ЕОМ у геофізиці ознаменувало новий етап її розвитку. У 1960—1970 рр. з'явилися перші електронно-обчислювальні машини, які широко використовувались для введення і зберігання даних у системах автоматизованого оброблення інформації та використовували у своїй роботі перфокарти. В Інституті геофізики з 1977 р. функціонував обчислювальний центр колективного користування Відділення наук про Землю АН УРСР, оснащений ЕОМ другого (Мінськ-22) і третього (М-4030, М-4030-1, ЕС-1034, ЕС-1050, Мир, См-2) поколінь.

В ті часи програмісти не могли спілкуватися з машиною напряму так, як це нині робимо ми, працюючи на комп'ютері. Для цього існували: мова програмування низького рівня «Асемблер», пізніше — перша мова високого рівня «Фортран», універсальна мова програмування для широкого кола застосування «Алгол» та ін. Програмування виконувалось за допомогою перфокарт і накопичувача команд керування.

Одне завдання могло складатися з цілої колоди перфокарт. У разі помилки необхідно було набивати нову перфокарту і знову подавати колоду перфокарт із завданням на перерахунок. Надалі перфокарти були замінені магнітними стрічками, які також не проіснували довго і нині, як і перфокарта, практично витіснені компактнішими, швидшими та зручнішими напівпровідниковими, магнітними та оптичними носіями.

Часткова автоматизація обробки та інтерпретації геофізичних даних істотно поліпшила їх геологічну інтерпретацію. Однак необхідність багаторазової підготовки вихідних даних, введення їх в ЕОМ, виведення результатів обчислень на друк тощо не сприяли значній ефективності використання ЕОМ під час такого опрацювання інформації. Крім того, за часткової автоматизації складно (а в деяких випадках і практично неможливо) виробити єдиний підхід до вирішення всього обсягу завдання. Усе це поставило питання про необхідність створення автоматизованих систем обробки та інтерпретації геофізичних даних.

Великий внесок В.І. Старостенка у справу прогресу цього нового напрямку добре відомий фахівцям (наприклад: [Старостенко и др., 1972]). Багато з його робіт стали основоположними для нових наукових напрямів і, зокрема, привели до створення перших в СРСР автоматизованих систем у геофізиці. В.І. Старостенко — один з основних авторів систем, що дістали всебічну практичну апробацію і широко експлуатувалися у виробництві: з оброблення та інтерпретації гравітаційних

і магнітних даних (1972, 1974 рр.); оперативного опрацювання даних акустичного каротажу (1974 р.); морських магнітометричних вимірювань (1974 р.).

У ті ж самі роки В.І. Старостенко виконував роботи, присвячені актуальним питанням теорії та практики обробки й інтерпретації гравіметричних і магнітометричних спостережень. Так, було подано розв'язок прямої задачі гравіметрії для неоднорідної за вертикаллю чотирикутної усіченої піраміди, що виявилася зручною як одиничне тіло під час апроксимації геологічних розрізів [Старостенко, Заворотько, 1976]. Надалі це трансформувалось у програму *PIRAM*, в якій при розрахунках земну кору апроксимували тілами, контури яких відповідають морфології геологічних неоднорідностей на поверхні фундаменту з продовженням їх на весь розріз земної кори. У кожному шарі для кожного розрахункового тіла визначали значення надмірної густини на покрівлі і градієнт зміни густини з глибиною. Появу додаткових границь зміни густини першого (із стрибком) або другого (із зміною градієнта) роду враховували шляхом ділення відповідних тіл. Незважаючи на те, що підготовка даних для розрахунків і побудова отриманих результатів потребували великої кількості ручної праці, ця програма надалі мала велике значення для побудови регіональних густинних моделей кори і верхньої мантії Землі та під час вивчення локальних структур.

Від 1974 р. В.І. Старостенко займається проблемою розв'язання некоректно поставлених задач геофізики, і цей напрям, який має фундаментальне значення для розвитку сучасної геофізики, стає основним на довгі роки. У цьому важливому теоретичному напрямку наук про Землю, що дуже швидко розвивався, вченому вдалося знайти нові рішення. В монографії В.І. Старостенка «Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии» [1978] показано основні способи побудови та використання математичних моделей інтерпретації. Розкрито важливе значення теорії некоректно поставлених задач і

методу регуляризації О.М. Тихонова для розв'язування складних обернених задач. Сформульовано широкий клас рудних і структурних гравіметричних задач, які зводяться до наведених алгоритмів. Подано стійкі алгоритми обчислення похідної задачної функції та редукування гравітаційного поля. Ця книга витримала випробування часом, її зміст й досі впливає на розвиток теорії та практики інтерпретації гравітаційних і магнітних аномалій, а також становить неабиякий інтерес для геофізиків, які займаються кількісною інтерпретацією гравіметричних і магнітометричних спостережень.

У 1983—1987 рр. В.І. Старостенко отримав розв'язок прямої задачі гравіметрії та магнітометрії для неоднорідного за радіальним напрямком тіла, обмеженого сферичними координатними поверхнями. У результаті для розрахунків гравітаційного ефекту була створена програма розв'язання прямої тривимірної задачі гравіметрії, що враховує сферичність Землі. Елементарним тілом для розрахунків був паралелепіпед із розміром сторін 1° за широтою і довготою [Старостенко и др., 1986].

Сучасні теоретичні і методичні розробки у сфері геофізики потребують технологічних способів роботи з геолого-геофізичними даними та комп'ютерних програм, які мають відповідати умовам швидкого і чіткого подання інформації про середовище, комбінування її з іншими даними, експортування в існуючі програмні продукти тощо. Розробка автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів *GMT-Auto* є подальшим розвитком ідей і методів, які почали створювати вітчизняні та зарубіжні геофізики під час впровадження ЕОМ (комп'ютерів) у геофізичну практику.

Створення автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів *GMT-Auto* можна умовно розділити на три етапи: 1995—2000 рр., 2001—2009 рр. і 2010 р. — сьогодення (рис. 1).

1995—2000 рр. Перші кроки у напрямі створення комплексу розпочато в 1995 р., коли в наше життя почали входити персо-

нальні комп'ютери. Роботи були спрямовані передусім на гравітаційне моделювання, оскільки вивчення питань гравіметрії та дослідження глибинної будови земної кори й верхньої мантії України були і є основними напрямками наукової діяльності Відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, який В.І. Старостенко очолює з 1976 р.

В.І. Старостенко завжди вважав, що запропоновані рішення мають бути зручними для здійснення повного циклу автоматизації розв'язування задач гравіметрії, під час якого в комп'ютер вводиться інформація, яка має паперовий вигляд, а результатом є вихідна інформація у графічному форматі. Тому роботи в ці роки проводились у трьох напрямках практично одночасно.

Передусім були надані розв'язки прямої задачі гравіметрії для неоднорідної довільно усіченої вертикальної прямокутної призми, в якій густина змінюється лінійно вздовж горизонтальних координат на верхній і нижній основах і лінійно або експоненціально вздовж будь-якої вертикальної лінії, причому так, що у вершинах призми густина набуває заданих значень. Було знайдено рішення, а також розроблено комплекс програм для розрахунку гравітаційних ефектів у прямокутній і сферичній системах координат — програми *3D Gravity* та *Sfera* відповідно [Старостенко, 1978; Starostenko, Legostaeva, 1998; Легостаєва, 1999]. Призма є не тільки зручною для формування геологічних контактних поверхонь і різних структурних об'єктів, а й дає змогу автоматизувати такі важливі процедури: 1) введення у комп'ютер вихідної геолого-геофізичної інформації, заданої у вигляді карт; 2) підготовка за зображеннями карт цифрових даних, що безпосередньо використовуються для розв'язання прямих задач.

Зазначимо, що основний обсяг геолого-геофізичної інформації здебільшого зберігається у вигляді карт, схем, розрізів, графіків тощо. Тому для роботи з ними було розпочато розроблення програм, які

виконують за допомогою дигітайзера (програма *PLOT3DST*), а потім і сканера, тобто автоматизоване введення в комп'ютер цих даних із подальшим поданням їх у цифровому вигляді. Першою була програма *MAP*, яка орієнтована для роботи з картами, що не містять зображень функцій із розривами першого роду [Старостенко и др., 1997]. Роботи виконувались сумісно з Міжнародним науково-навчальним центром інформаційних технологій і систем НАН України і Міністерства освіти і науки України (Київ)¹.

У ті роки було приділено достатньо уваги питанню автоматизованої побудови геофізичних карт за значеннями поля у довільних точках площини. Постало питання модифікації та реалізації на сучасних комп'ютерах алгоритмів, які раніше використовували у комплексі програм для ЕОМ Мінськ-22 й експлуатували на виробництві [Бас та ін., 1970]. Цьому передували такі обставини. По-перше, через зміну поколінь ЕОМ програмний комплекс для ЕОМ «Мінськ-22» виявився загубленим. По-друге, у зарубіжній літературі розв'язанню задачі триангуляції (побудові мережі трикутників, що не перетинаються, за довільно заданими точками на площині) почали приділяти велику увагу.

У результаті було вдосконалено алгоритми та створено програмний комплекс, що дало змогу розв'язати такі завдання: по-

¹ Необхідно зазначити, що всі програми і програмні комплекси, які призначені для введення в комп'ютер зображень геологічних й геофізичних карт і отримання їх у чисельному вигляді, розроблялись сумісно з Міжнародним науково-навчальним центром інформаційних технологій і систем НАН і Міністерства освіти і науки України (Київ). Автори вдячні проф. М.І. Шлезінгеру за систематичний і плідний інтерес до цієї роботи та корисні зауваження, їх було враховано при створенні програм і комплексів. Реалізація ідей зі створення програми *Spacemap* та інтерактивних комплексів *GEOPHYS0* й *Isohypse* належить В.М. Шарипанову, який упродовж багатьох років плідно співпрацював з нашим колективом. На жаль, на останній стадії розроблення комплексу *Isohypse* він пішов із життя, і його справу продовжив син А.В. Шарипанов, якому ми дуже вдячні за те, що він зміг закінчити роботу, розпочату батьком.

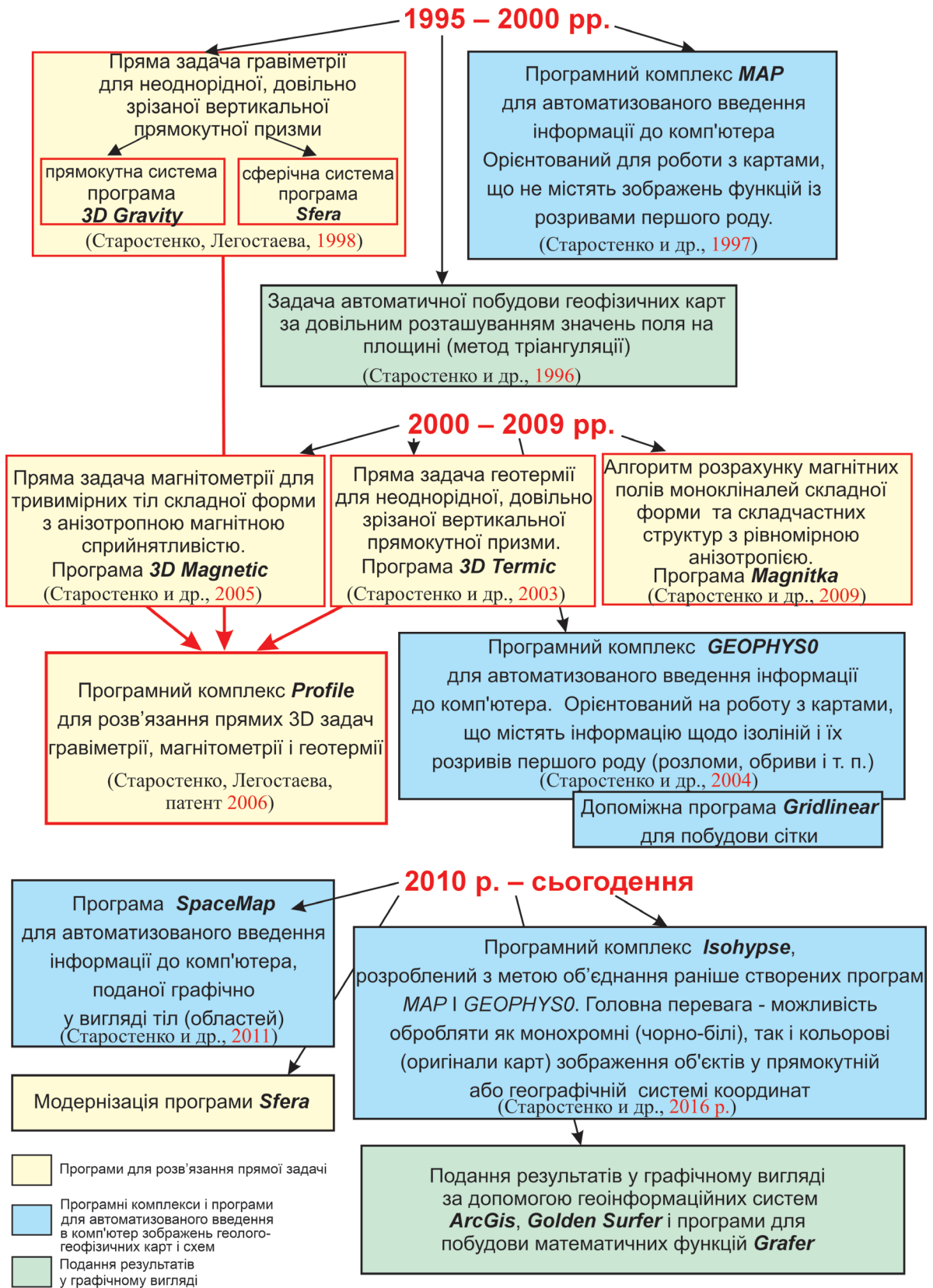


Рис. 1. Головні етапи створення автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів GMT-Auto.

Fig. 1. The main stages of creating an automated complex for interpreting potential fields GMT-Auto.

будова мережі неперетинних трикутників, простежування ліній рівного значення за системою трикутників, формування масиву ізоліній за значенням першої ізолінії та кроком, згладжування ізоліній сплайн-функціями, формування файлу для виводу на принтер або плотер. Було зіставлено роботи модифікованих алгоритмів із деякими широко відомими алгоритмами, розробленими на той час. З'ясовано, що програмний комплекс вирішує завдання автоматизованої побудови карт конкурентоздатно порівняно з методами, в яких застосовано тріангуляцію Делоне, інші види тріангуляції (*Surfer 5.0*), та успішніший за методи, що використовують поліноміальну апроксимацію поверхонь (*Surfer 4.04*) [Старостенко и др., 1996].

У 2001—2009 рр. було продовжено роботи з розробки інтерактивних програмних комплексів, що здійснюють автоматизацію введення в комп'ютер інформації, що зберігається у графічній формі. Особливу увагу було приділено створенню «дружнього інтерфейсу», а саме змозі швидко обмінюватися під час роботи інформацією між комп'ютером і користувачем в інтерактивному режимі (програма мала задавати питання і в разі якихось невизначеностей попереджати про деякі допущені помилки та ін.).

У 2004 р. був створений програмний комплекс *Geophys0*, призначений для автоматизованої інтерактивної обробки чорнобілих зображень геолого-геофізичних даних, головним змістом яких є інформація щодо ізоліній і їх розривів першого роду (розломи, обриви і т.п.) [Старостенко и др., 2004]. Введення ізоліній в комплексі здійснюється в напівавтоматизованому режимі. Для замкнутих ізоліній вводиться лише їхнє значення, решті ізоліній воно присвоюється після їх відтворення за допомогою додаткових функцій меню. Додатково була розроблена програма *Gridlinear* для побудови рівномірної сітки вхідних даних для розв'язання прямих задач.

Ефективність використання створюваних програм введення інформації в комп'ютер обумовлена вдосконаленням комп'

лексів розв'язування прямих (обернених) задач геофізики (гравіметрії, магнітометрії, геотермії тощо). Тому з 2003 по 2009 рр. основну увагу було приділено створенню програмного комплексу *Profile* [Старостенко, Легостаева, 2006], який включає можливість розв'язання прямих задач гравіметрії [Starostenko, Legostaeva, 1998], магнітометрії [Starostenko et al., 2005] і геотермії [Starostenko et al., 2003]. У разі використання спільних аналогічних відомих розв'язків задач гравіметрії, магнітометрії і геотермії зручно будувати локальні і регіональні комплексні геофізичні моделі за сукупністю геолого-геофізичних даних.

У 2003 р. подано розв'язок прямих стаціонарних задач геотермії стосовно розподілу в однорідному півпросторі тепла і теплового потоку, що породжуються стаціонарним джерелом, яким слугує неоднорідна довільно зрізана вертикальна прямокутна призма. Прийнято, що коефіцієнт теплопровідності λ в призмі постійний, а густина тепло генерації Q така, що змінюється лінійно уздовж горизонтальних координат на верхній і нижній основах і лінійно або експоненціально уздовж будь-якої вертикальної лінії, причому так, що у вершинах призми густина теплогенерації приймає задані значення. Знайдені розв'язки полегшують створення автоматизованих систем кількісної інтерпретації геотермічних даних в інтерактивному режимі [Starostenko et al., 2003].

У 2005 р. надано строге розв'язання прямої задачі магнітометрії для довільно зрізаних вертикальної прямокутної призми і чотирикутної піраміди з анізотропною магнітною сприйнятливістю, яка всередині тіл задана як функція координат [Starostenko et al., 2005]. Призми і піраміди зазначених форм зручні і призначені відповідно для апроксимації структурних і рудних геологічних утворень. Із знайдених рішень, як окремий випадок, отримано формули для призми і піраміди з ізотропною (однорідною) магнітною сприйнятливістю. Вони призначені для інтерпретації регіональних магнітних полів.

У 2009 р. для розв'язання прямої задачі

магнітометрії створена програма *Magnitca* [Starostenko et al., 2009], як подальший крок для розв'язання задач магнітометрії. Було вдосконалено теорію розподілу об'ємної та поверхневої магнітних мас у тривимірних анізотропних тілах і розв'язання для них прямої задачі магніторозвідки. Запропоновано алгоритм обчислення магнітних полів для монокліналей складної форми і складчастих структур з однорідною анізотропією. Основою алгоритму є експериментально встановлені В.М. Завойським у результаті багаторічних досліджень величезного фактичного матеріалу закономірності зв'язку між анізотропією магнітної сприйнятливості, тектонічною структурою й аномальним магнітним полем. Використання цих закономірностей дає можливість позбутися необхідності апроксимації геологічних об'єктів набором елементарних тіл, що істотно скорочує обсяг потрібної підготовчої роботи, і дає можливість безпосередньо обчислювати магнітні поля від моноклінальних складок або монокліналей, які ізотропні або анізотропні, але однорідні. Це не тільки спрощує розв'язання задачі, а й істотно полегшує підготовку необхідних для цього вихідних даних польових спостережень, що особливо важливо. Алгоритм орієнтований на широке практичне застосування при побудові тривимірних магнітних моделей локальних і регіональних геологічних структур.

У програмі *Magnitca* крім загального випадку, коли розраховується магнітний ефект від пласта (шару), що розбивається на окремі елементарні тіла (зрізаної прямокутні призми), передбачена можливість проведення розрахунків для спеціального випадку, коли джерелом аномального магнітного поля є одне тіло (опуклий багатогранник довільної форми або складка). У загальному випадку для всіх елементарних тіл використовується магнітна модель — «одновісний тензор». Розроблена також модифікація програми, яка дає змогу розрахувати магнітний ефект від шару для ізотропного випадку.

Таким чином, для розв'язання прямих задач гравіметрії (*3D Gravity*) і геотермії

(*3D Termica*) в 2006 р. було розроблено програмний комплекс *Profile*, в якому додатково реалізовано можливість врахування рельєфу місцевості, а для розв'язання прямої задачі магнітометрії з 2009 р. використовується програма *Magnitca*.

При використанні програмного комплексу *Profile* під час виконання геофізичних задач неоднорідні горизонтально-шаруваті локальні і регіональні геологічні структури апроксимовано набором неоднорідних, довільно зрізаних вертикальних прямокутних призм. При цьому контактні поверхні формуються як сукупність «черепичок», якими є основи призм [Старостенко, 1978].

Кожна програма дає змогу розв'язати задачу для багат шарових моделей (від 1 до 9 шарів). Вхідна інформація вводиться для кожного шару окремо, залежить від обраної задачі і являє собою опис рельєфу верхньої і нижньої поверхонь шару, а також інформацію про розподіл фізичного параметра на них у вигляді карт або значень (густина (σ) — у задачах гравіметрії, густина теплогенерації (Q) — у задачах геотермії). Для розрахунку магнітного ефекту (анізотропний випадок) передбачено задання складових напруженості нормального поля (T_0) і трьох головних значень тензора магнітної сприйнятливості (χ). Для ізотропного випадку задається інформація про складові напруженості нормального магнітного поля і намагніченості (I).

2010 р. — сьогодні. Робота зі створення інтерактивного програмного комплексу *Isohypse* була розпочата в 2010 р. і тривала шість років. Цей комплекс розроблений з метою об'єднання раніше створених програмних продуктів *MAP* [Старостенко и др., 1997] й *GEOPHYS0* [Старостенко и др., 2004] і призначений для формування в пам'яті комп'ютера тривимірного опису геолого-геофізичних об'єктів, поданих у вигляді ізоліній та розломів (функції з розривами першого роду). Головною перевагою комплексу *Isohypse* є можливість обробляти як монохромні (чорно-білі), так і кольорові (оригінали карт) зображення об'єктів формату Bitmap, подані в прямокутній або географічній системі координат.

нат. При цьому жодне додаткове ручне опрацювання не потрібне. Введення ліній (розломів або ізоліній) здійснюється за допомогою кривих Безьє і виконується однаково під час роботи в різних системах координат, що дає змогу простіше імітувати поверхні геофізичних об'єктів. У кожному вузлі заданої сітки значення геолого-геофізичного параметра визначається різними методами: лінійної інтерполяції, екстраполяції за поліномом Лагранжа, інтерполяції за кривою Безьє. У програмному комплексі *Isohypse* реалізовано низку можливостей, що зумовлені специфічними вимогами до оброблення деяких зображень геофізичних об'єктів [Старостенко и др., 2016].

При виконанні геофізичних завдань не завжди інформація о середовищі є у вигляді ізоліній. Спроби опису геологічних тіл за допомогою ізоліній призводили до виникнення помилок у вихідному файлі та потребували при цьому значного часу. Тому в 2010—2011 рр. було розроблено програму *SpaceMap*, яка стала ще одним кроком в удосконаленні автоматизованого введення в комп'ютер зображень геологічних і геофізичних карт та побудови їх цифрових моделей. Це перша програма, що дала змогу вводити інформацію, подану графічно у вигляді тіл (областей), це спростило виконання досліджень консолідованої кори, а саме вивчення глибинної будови щитів [Старостенко и др., 2011].

У 2015 р. був удосконалений алгоритм програми *Sfera*, що також спричинило відповідні зміни й в інтерфейсі. У новій версії програми була додана можливість завдання глибини залягання покрівлі та підшви шару у вигляді як числа, так і файлу. Для побудови результатів розрахунків у географічній системі координат почали використовувати геоінформаційну систему *ArcGis*.

У 2021 р. був зроблений ще один крок у використанні комплексу *GMT-Auto*. Було розпочато роботу з побудови густинних моделей вздовж лінії профілю, що включає такі етапи: 1) визначення параметрів досліджуваних структур за наявними гео-

лого-геофізичними даними та побудова початкового варіанта розрізу; 2) уточнення розрізу за допомогою розв'язання прямої задачі гравіметрії (наприклад; [Снті́н та ін., 2021; Макаренко та ін., 2023]). Автоматизоване введення в комп'ютер шарів земної кори і побудова їх цифрових моделей, що є вхідними даними для розв'язання прямої задачі гравіметрії, виконується за допомогою програмного комплексу *Isohypse* і програми *Spacemap*, для розв'язання прямої задачі гравіметрії застосовується програмний комплекс *Profile*. Для побудови кривих аномального гравітаційного поля та гравітаційних ефектів використовується програма для побудови графіків математичних функцій *Grafer*.

На сьогодні комплекс складається з таких основних блоків: 1) автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт і побудова їх цифрових моделей, які є вхідними даними для розв'язання прямої задачі; 2) розв'язання прямої задачі для тривимірних моделей чи моделей вздовж лінії профілю; 3) представлення результатів рішення прямої задачі в графічному вигляді [Старостенко и др., 2015].

За допомогою геоінформаційних систем — *ArcGis*, *Golden Surfer* і програми для побудови графіків математичних функцій *Grafer*, виконуються побудова результатів розрахунків у прямокутній та географічній системах координат, а також трансформація отриманих даних в необхідну проєкцію, побудова ізоповерхонь середовища, вибірка даних за заданим критерієм або всередині певної області для побудови графічних зображень функцій двох змінних.

Досвід практичного використання комплексу. Теоретичні й методичні результати В.І. Старостенка дали змогу розгорнути широкі дослідження проблеми побудови густинних моделей за гравітаційним полем. Ця проблема має першорядне значення для вивчення глибинної будови земної кори та мантиї і розвивається і досліджується постійно.

Протягом усієї наукової діяльності В.І. Старостенко звертається до проблеми формалізації та автоматизації методу

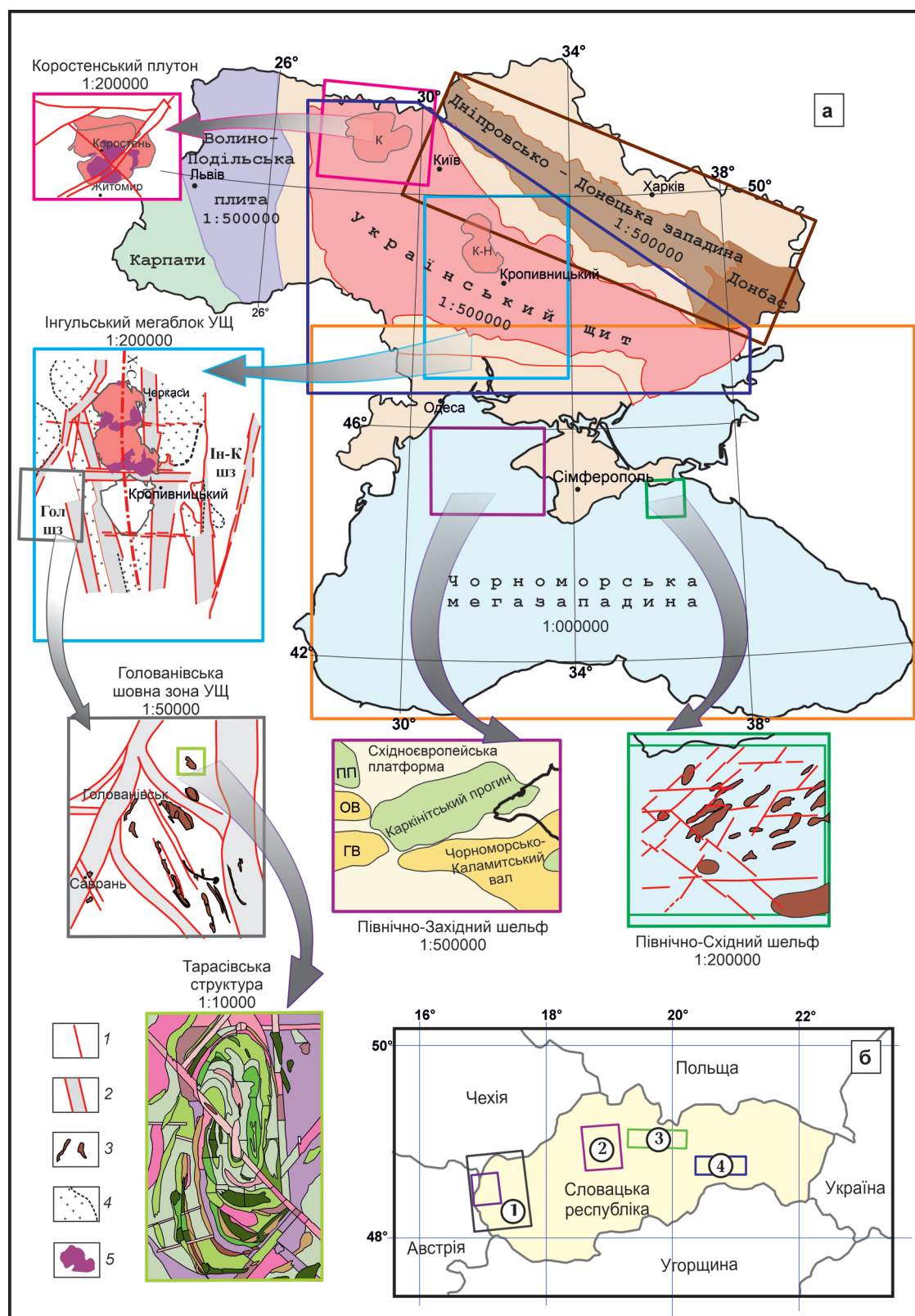


Рис. 2. Оглядова схема розміщення регіонів, для яких виконано 3D гравітаційне моделювання при використанні автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів GMT-Auto: а — територія України і прилеглі регіони (1 — розломи, 2 — зони розломів, 3 — локальні структури, 4 — масиви гранітоїдів Інгульського мегаблока Українського щита, 5 — масиви габро-анортозитів Коростенського (К) і Корсунь-

Новомиргородського (К-Н) плутонів); б — територія Словачької республіки. Западини: 1 — Віденська, 2 — Ліптовська, 3 — Турчанська, 4 — масив ґемерських гранітів центральної частини Західних Карпат.

Fig. 2. Overview scheme of the regions for which 3D gravity modeling was performed using *GMT-Auto*, the automated complex for interpreting potential fields: а — the territory of Ukraine and adjacent areas (1 — faults, 2 — fault zones, 3 — local structures, 4 — granitoids massifs of the Ingul Domain of the Ukrainian Shield, 5 — gabbro-anorthosite massifs of the Korosten (K) and Korsun-Novomyrhorod (K-N) plutons); б — territory of the Slovak Republic. Depressions: 1 — Vienna, 2 — Liptov, 3 — Turchian, 4 — massif of Hemer granites of the central part of the Western Carpathians.

підбору — найпоширенішого способу кількісної інтерпретації спостереженого гравітаційного поля, модифікації якого застосовуються для розвідувальних робіт, регіональних досліджень або використання їх у комплексі. Нині метод підбору в об'ємному варіанті в результаті застосування сучасного спеціалізованого програмного забезпечення комплексу *GMT-Auto* технічно трансформувався в 3D гравітаційне моделювання, яке уможливорює розв'язання складніших геологічних завдань. Його принципова перевага — велика точність обчислення модельного поля неоднорідних реальних геологічних структур.

Успішне розв'язання геолого-геофізичних задач на підставі високої роздільної інтерпретаційної технології комплексу *GMT-Auto*, що забезпечує опрацювання та аналіз різних типів графічних геолого-геофізичних матеріалів, висвітлено в монографії [Макаренко та ін., 2021], в якій зібрано матеріал напрацювань у сфері гравітаційного моделювання протягом багатьох років (рис. 2). У рамках досліджень побудовано регіональні моделі Чорноморської мегазападини і прилеглих територій (масштаб 1:1 000 000), Українського щита, Дніпровсько-Донецької западини та північно-західного шельфу Чорного моря (масштаб 1:500 000), середньомасштабні моделі Інгульського мегаблока УЩ і північно-східного шельфу Чорного моря (1:200 000), а також детальну модель центральної частини Голованівської шовної зони Українського щита (масштаб 1:50 000). Уперше для платформної частини території України отримано нові дані щодо густинної неоднорідності земної кори, які значно доповнили сучасні уявлення про глибинну будову як окремих тектонічних структур,

так і регіону в цілому. Окремо виконано тривимірне гравітаційне моделювання для Коростенського плутону Українського щита, в результаті якого було з'ясовано основні закономірності будови земної кори цієї структури [Bogdanova et al., 2004].

Застосування автоматизованого комплексу інтерпретації потенціальних полів *GMT-Auto* дало можливість вийти за межі власне гравіметрії та використовувати цей метод не тільки для розв'язання задач регіонального плану, а й вирішення важливих, складних прикладних завдань сучасної геології. Наведемо декілька прикладів.

Так, уперше за даними тривимірного густинного моделювання було побудовано схему розподілу густини на поверхні фундаменту Тарасівської базит-метабазитової структури площею 2,5×5,5 км, що поширюється на глибину не більше як 3—4 км (див. рис. 2) [Старостенко та ін., 2022]. У результаті було отримано розподіл густинної неоднорідності до глибини 5 км і визначено глибини залягання геологічних тіл: із підвищеною густиною — 2 км, гранітоїдів — 3 км, чарнокітів та ендербітів нерозчленованих — 4 км. Було з'ясовано, що апогаброїди та апонорити із середньою густиною 2,80—2,90 г/см³, які утворюють центральну частину Тарасівської структури, поширюються до глибини 2 км без зміни кута їх падіння, що підтверджується даними сейсмометрії та електророзвідки. Зроблено висновок, що мала глибинність Тарасівської структури та відсутність підвідних каналів, імовірно, можна пояснити потужними зсувними процесами в межах Голованівської шовної зони, що обумовили утворення детачменту на глибині (сучасній) 3—4 км, унаслідок чого верхня частина Ятранського блока разом з Тарасівською базит-метабазитовою структурою доволі

сильно пересунулася на південь, зірвавши її з кореневої частини.

Серед публікацій В.І. Старостенка, у яких подано вирішення практичних геологічних завдань за геофізичними матеріалами, особливе місце займає праця, присвячена вивченню Горішньоплавнинського родовища — одного із залізрудних родовищ Кривого Рогу [Крутиховская и др., 1972]. У результаті інтерпретації було надано повну характеристику будови родовища на глибині. З метою практичної перевірки матеріалів інтерпретації в 1974 р. було пробурено свердловину, яка повністю підтвердила висновки, зроблені геофізиками. Це дало змогу дійти важливого висновку щодо великих резервів збільшення запасів залізних руд для Дніпровського гірничозбагачувального комбінату в разі введення в експлуатацію глибших горизонтів.

Волею долі, практично через 50 років, у 2021 році Горішньоплавнинській структурі знову було приділено увагу. Державним підприємством «Українська геологічна компанія» та Інститутом геофізики НАН України з метою з'ясування морфології та елементів залягання рудного покладу в межах Горішньоплавнинсько-Лавриківської ділянки Криворізько-Кременчуцької смуги було виконано новітні дослідження [Єнтин та ін., 2021]. Застосування при цьому сучасного програмного забезпечення автоматизованого комплексу *GMT-Auto* нарівні із всебічним аналізом наявної геологічної інформації дали змогу отримати великий масив нових геолого-геофізичних даних щодо глибинних структурно-морфологічних особливостей будови Горішньоплавнинської структури, пов'язаної із Криворізькою глибинною зоною розломів.

Програмний комплекс був широко апробований, він добре себе зарекомендував при вивченні Карпатсько-Паннонського регіону сумісно з Інститутом наук про Землю (геофізичний відділ) Словацької Академії наук та Comenius University, Словацька республіка, з якими Інститут геофізики НАН України пов'язує багаторічна праця починаючи з 2000 р. При використанні

комплексу *GMT-Auto* була побудована 3D гравітаційна модель осадового заповнення Карпатсько-Паннонського регіону з метою отримання залишкового гравітаційного поля, яке відображає густинні неоднорідності консолідованої частини кори; виконано густинне моделювання для окремих структур (Ліптовська, Тульчанська, Віденська западини та масив ґемерських гранітів центральної частини Західних Карпат) (рис. 2, б); побудовано нову цифрову карту глибин залягання поділу Мохо при використанні нових даних сейсмометрії [Szalaiová et al., 2008; Krajňák et al., 2012; Bielík et al., 2013, 2018, 2022].

Автоматизований комплекс *GMT-Auto* має широку географію розповсюдження, яка охоплює геолого-геофізичні дослідження різних куточків світу, міжнародну співпрацю, лекції про можливості комплексу (рис. 3). Він був успішно використаний при вивченні морської та прибережної частини території Нідерландів (Vrije Universiteit, Нідерланди (м. Амстердам) [Dirkzwager et al., 2000]; при комплексному геофізичному дослідженні материкової окраїни Гвінеї [Козленко, Козленко, 2019]; при побудові гравітаційної моделі Болгарії (Національний інститут геофізики, геодезії і географії Болгарської академії наук (м. Софія)); при побудові 3D гравітаційної моделі з метою вивчення структури літосфери, її геодинаміки та тектоніки у В'єтнамському регіоні (Інститут геофізики В'єтнамської академії науки і технологій (м. Ханой)). На практичних прикладах з комплексом були ознайомлені науковці в Інституті геодинаміки Румунської академії (м. Бухарест) і в Інституті наук про Землю (геофізичний відділ) Словацької Академії наук. Курс лекцій про комплекс, метод підбору і тривимірне густинне моделювання було прочитано в Comenius University, Словацька республіка (м. Братислава), у Північно-Західному Інституті Китаю (м. Лянчжоу) та в компанії SINOPEC, Північно-Західний Китай (м. Дуньхуан (Dunhuang)).

Таким довгим і складним є шлях від ідеї В.І. Старостенка до створення нового автоматизованого комплексу інтерпрета-

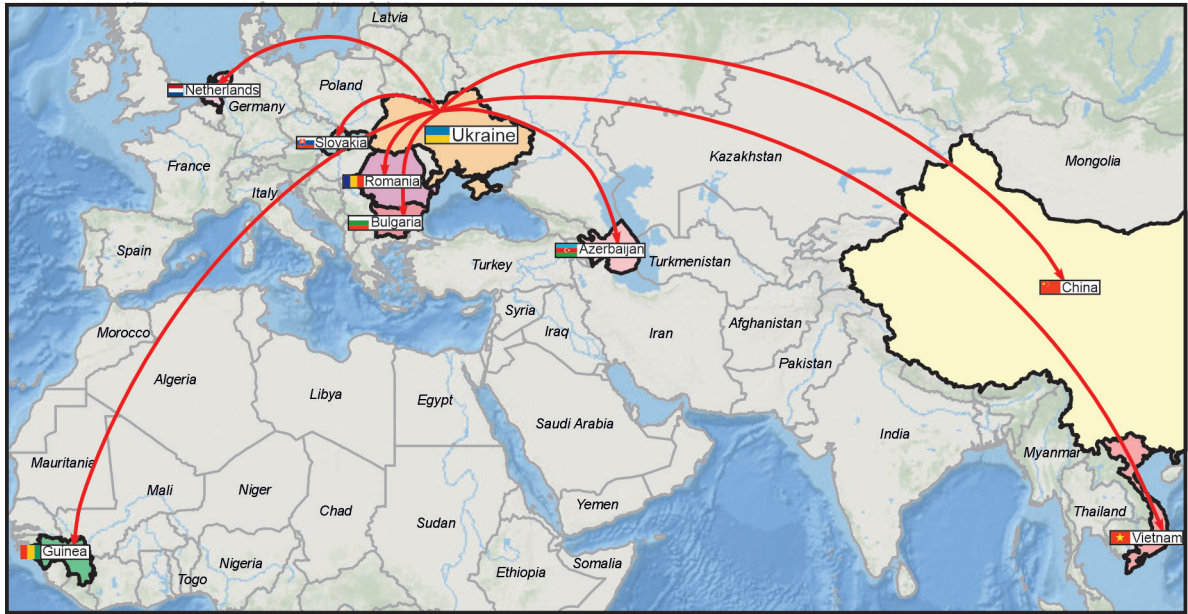


Рис. 3. Географія розповсюдження автоматизованого комплексу GMT-Auto.

Fig. 3. Geographical distribution of the automated complex GMT-Auto.

ції потенціальних полів GMT-Auto і його практичного використання. Слід зазначити, що комплекс — це не тільки програми. При його створенні були охоплені актуальні напрями сучасної геофізики: теорія інтерпретації потенціальних полів; проблема створення автоматизованих систем оброблення та інтерпретації на ЕОМ (комп'ютерах) гравіметричних, магнітометричних і геотермічних даних; теорія й методика розв'язування некоректно поставлених задач геофізики; методика і технологія побудови тривимірних густинних моделей кори та верхньої мантії Землі. Кожен з перелічених напрямів В.І. Старостенко збагатив працями першорядного наукового значення, багато питань було поставлено і вирішено ним уперше в геофізиці. Виконані роботи ще раз підкреслюють важливий внесок В.І. Старостенка

у розвиток геофізики. Завдяки його теоретичним і методичним розробкам є можливість вирішувати геологічні завдання і отримувати нові результати.

Ми вітаємо нашого дорогого керівника, наставника, вчителя — Віталія Івановича — зі славним ювілеєм! Дякуємо Вам за все! За багаторічну плідну працю, корисні і мудрі поради не тільки в науковій роботі, а й в особистому житті, за підтримку і можливість обирати свій шлях, постійно вчитись новому і рухатись вперед. Своїм прикладом Ви нас навчили головному, що наука — це сенс життя, що це цікавий світ саморозвитку і можливість знайти себе в улюбленій професії. Бажаємо Вам здоров'я та сили, удачі та радості, стійкості духу, насаги, реалізації планів і нових ідей. Нехай небо над головою буде мирним і чистим, а сонце — яскравим.

Список літератури

- Бас Р.Г., Дядюра В.О., Старостенко В.І. Алгоритми автоматичної побудови геофізичних карт за значеннями поля в довільних точках площини. *Доп. АН УССР. Сер. Б.* 1970. № 9. С. 799—803.
- Єнтін В.А., Орлюк М.І., Білоус О.І., Гінтов О.Б.,

- Малахов В.Г., Бахмутов В.Г., Качан І.О., Бакаржієва М.І., Макаренко І.Б., Савченко О.С., Самойленко Т.М., Марченко А.В., Друкаренко В.В., Поляченко Є.Б., Мичак С.В., Роменець А.О., Брайко О.В. Глибинна будова Горішне-Плавнинської

- структури та загальні принципи геолого-геофізичного вивчення Криворізько-Кременчуцької залізорудної смуги. *Геофіз. журн.* 2021. Т. 43. № 6. С. 42—69. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251552>.
- Козленко М., Козленко Ю. *Глубинное строение материковой окраины Гвинеи на основе данных сейсмометрии и гравиметрии*. LAPLAMBERT Academic Publishing, 2019, 137 с.
- Крутиховская З.А., Старостенко В.И., Гарбуза А.А. О построении структурных карт подошвы криворожской и метабазитовой серий по гравиметрическим данным путем моделирования. *Геофиз. сб.* 1972. Вып. 45. С. 67—72.
- Легостаева О.В. Об оптимальной схеме вычисления двойных интегралов при решении прямых задач гравиметрии и магнитометрии. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 3. С. 127—130.
- Макаренко І., Савченко О., Дерерова Я., Муровська Г., Старостенко В., Бієлік М., Легостаєва О. Глибинна будова Закарпатського прогину (українська частина) за даними густинного моделювання. *Геофіз. журн.* 2023. Т. 45. № 4. С. 43—83. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i4.286285>.
- Макаренко І.Б., Старостенко В.І., Купрієнко П.Я., Савченко О.С., Легостаєва О.В. *Неоднорідність земної кори України і суміжних регіонів за результатами 3D гравітаційного моделювання*. Київ: Наук. думка, 2021, 204 с.
- Старостенко В.И. *Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии*. Киев: Наук. думка, 1978, 228 с.
- Старостенко В.И., Бас Р.Г., Бутаков Г.С., Дядюра В.А. *Автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии*. Киев: Наук. думка, 1972, 164 с.
- Старостенко В.И., Дядюра В.А., Легостаева О.В. Автоматическое построение геофизических карт по значениям поля в произвольных точках плоскости. *Доп. НАН України*. 1996. № 10. С. 113—118.
- Старостенко В.И., Загоротько А.Н. *Методика и комплекс программ решения обратной линейной задачи гравиметрии на ЭВМ «Минск-22»*. Киев: Наук. думка, 1976, 61 с.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В. *Комп'ютерна програма «3-Д моделювання потенційних полів»*. Свідство про реєстрацію авторського права на твір № 16867, дата реєстрації 06.06.2006.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Павлюк Е.В., Шарыпанов В.М. Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами первого рода и визуализации в интерактивном режиме трехмерных геофизических моделей и их полей. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 1. С. 3—13.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Савченко А.С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322>.
- Старостенко В.І., Макаренко І.Б., Савченко О.С., Купрієнко П.Я., Легостаєва О.В. Тривимірна густинна модель Тарасівської базит-метабазитової структури Голованівської шовної зони Українського щита. *Геофіз. журн.* 2022. Т. 44. № 2. С. 135—151. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256269>.
- Старостенко В.И., Манукян А.Г., Загоротько А.Н. *Методика решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии на шарообразных планетах*. Киев: Наук. думка, 1986, 112 с.
- Старостенко В.И., Мацелло В.В., Аксак И.Н., Кулеш В.А., Легостаева О.В., Егорова Т.П. Автоматизация ввода в компьютер изображений геофизических карт и построение их цифровых моделей. *Геофиз. журн.* 1997. Т. 19. № 1. С. 3—13.
- Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Савченко А.С., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. Об автоматизированной интерактивной обработке графических изображений геологических и геофизических объектов. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 54—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i1.2011.117325>.
- Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Шарыпанов А.В., Савченко А.С., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. Интерактивный программный комплекс Isohypse

- для построения трехмерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 30—42. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107720>.
- Bielik, M., Krajňak, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Starostenko, V., Bošanský, M., Grinè, M., & Hók, J. (2013). 3D gravity interpretation of the pre-Tertiary basement in the intramontane depressions of the Western Carpathians: a case study from the Turiec Basin. *Geologica Carpathica*, 64(5), 399—408. <https://doi.org/10.2478/geoca-2013-0027>.
- Bielik, M., Makarenko, I., Csicsay, K., Legostaeva, O., Starostenko, V., Savchenko, A., Simonova, B., Dererova, J., Fojtikova, L., Pasteka, R., & Vozar, J. (2018). The refined Moho depth map in the Carpathian-Pannonian region. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 48(2), 179—190. <https://doi.org/10.2478/congeo-2018-0007>.
- Bielik, M., Zeyen, H., Starostenko, V., Makarenko, I., Legostaeva, O., Savchenko, S., Dérerová, J., Grinč, M., Godová, D., & Pánisová, J. (2022). A review of geophysical studies of the lithosphere in the Carpathian-Pannonian region. *Geologica Carpathica*, 73(6), 499—516. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.73.6.2>.
- Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Buryanov, V.B., Makarenko, I.B., Orlyuk, M.I., Skobelev, V.M., Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (2004). The 1.80—1.74-Ga gabbro-anorthosite-rapakivi Korosten Pluton in the Ukrainian Shield: a 3-D geophysical reconstruction of deep structure. *Tectonophysics*, 381, 5—27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.023>.
- Dirkzwager, J.B., Stephenson, R.A., & Legostaeva, O.V. (2000). The pre-Permian residual gravity field for the Dutch onshore and adjacent offshore. *Global and Planetary Change*, 27(1-4), 53—66. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00059-5).
- Krajňak, M., Bielik, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Starostenko, V., & Bošanský, M. (2012). The first stripped gravity map of the Turcianska Kotlina Basin. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 181—199. <https://doi.org/10.2478/v10126-012-0017-4>.
- Starostenko, V.I., Kutas, R.I., & Legostaeva, O.V. (2003). Solution of stationary geothermal forward problems for an inhomogeneous vertical rectangular, arbitrarily truncated prism. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 39(12), 1021—1028.
- Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (1998). Calculation of the gravity field from an inhomogeneous, arbitrarily truncated vertical rectangular prism. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 34(12), 991—1003.
- Starostenko, V.I., Shuman, V.N., Ivashchenko, I.N., Legostaeva, O.V., Savchenko, A.S., & Skrinik, O.Ya. (2009). Magnetic fields of 3-D anisotropic bodies: theory and practice of calculations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 45(8), 640—655. <https://doi.org/10.1134/S1069351309080047>.
- Starostenko, V.I., Zavoisky, V.N., & Legostaeva, O.V. (2005). The forward problem of magnetic survey for 3-D bodies of complex configuration with anisotropic magnetic susceptibility. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 41(7), 585—593.
- Szalaiová, E., Bielik, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Hók, J., Starostenko, V., Šujan, M., & Šefara, J. (2008). Calculation of a stripped gravity map with a high degree of accuracy: a case study of Liptovská Kotlina Basin (Northern Slovakia). *Geological Quarterly*, 52(2), 103—114.

From the idea to the creation of an automated interpretation system of potential fields GMT-AUTO: step by step

I.B. Makarenko, O.V. Legostaeva, O.S. Savchenko, 2025

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

We outline the way to *GMT-Auto*, an automated complex for interpreting potential fields. It includes three stages: 1995—2000, 2001—2009 and in 2010- the present day.

The work at each stage included solving direct problems and creating software for entering information presented on paper, and outputting the received data in the graphical format. In 1995—2000, solutions to the direct gravimetry problem for an inhomogeneous randomly truncated vertical rectangular prism were given and programs were developed for calculating gravitational effects in a rectangular (*3D Gravity*) and spherical (*Sfera*) coordinate systems. The *MAP* program was created. It is oriented towards working with maps that do not contain images of functions with discontinuities of the first order. Algorithms were improved and a software package was created, which made it possible to automatically build geophysical maps based on field values at discretionary points on the plane. In 2001—2009 the *Geophys0* package was developed for automated interactive processing of black and white images of geological and geophysical data, the main content of which is information about contour lines and their discontinuities of the first order (faults, breaks, etc.). In 2003, a solution was found for the direct stationary geothermal problems about the distribution of heat and heat flow in the homogeneous half-space, generated by a stationary source (an inhomogeneous, randomly cut, vertical rectangular prism). In 2005, there was found a strict solution to the direct magnetometry problem for a randomly cut vertical rectangular prism and a quadrangular pyramid with anisotropic magnetic accessibility (the accessibility is given inside the bodies as a function of coordinates). In 2006, the *Profile* software package was developed to solve direct problems in gravimetry, magnetometry, and geothermy, in which the possibility of taking into account the terrain relief was additionally implemented. In 2009, to solve the direct problem of magnetometry, an algorithm for calculating magnetic fields for complex-shaped monoclinals and folded structures with homogeneous anisotropy was proposed, and the *Magnitca* program was created. From 2010 to the present, work has been carried out to create the interactive software complex *Isohypse*, for processing monochrome (black and white) and color (original maps) images of objects given in rectangular or geographic coordinate systems. In 2010—2011, the *SpaceMap* program was developed, which made it possible to enter information into the computer, represented graphically in the form of bodies (areas). In 2015, the *Sfera* program algorithm was improved, adding the ability to specify the depth of the roof and the base of the layer both as a number and as a file. In 2021, the *GMT-Auto* complex began to be used to build density models along the profile line. The experience of its application is presented both for solving regional problems and for solving complex applied problems of modern geology.

Key words: automated systems, potential fields, automation of geological and geophysical data input into a computer, direct geophysical tasks, *GMT-Auto* complex, density modeling.

References

- Bas, R.G., Dyadyura, V.O., & Starostenko, V.I. (1970). Algorithms for automatic construction of geophysical maps based on field values at arbitrary points of the plane. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR. Ser.B*, (9), 799—803 (in Ukrainian).
- Entin, V.A., Orlyuk, M.I., Belous, O.I., Gintov, O.B., Malakhov, V.G., Bakmutov, V.G., Kachan, I.O., Bakarzhieva, M.I., Makarenko, I.B., Savchenko, O.S., Samoilenko, T.M., Marchenko, A.V., Drukarenko, V.V., Poliachenko, I.B., Mychak, S.V., Romenets, A.O., & Braiko, O.V. (2022). Depth structure of the Gorishne-Plavninsk structure and general principles of geological and geophysical study of the Krivoy Rog-Kremenchug iron-ore strip. *Geofizicheskii Zhurnal*, 43(6), 42—69. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251552> (in Ukrainian).
- Kozlenko, M., & Kozlenko, Yu. (2019). *Deep structure of the Guinea continental margin based on seismometry and gravimetry data*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 137 p. (in Russian).
- Krutikhovskaya, Z.A., Starostenko, V.I., & Garbutza, A.A. (1972). On the construction of structural maps of the basement of the Krivoy Rog and metabasite series from gravimetric data by modeling. *Geophysical collection*, (45), 67—72 (in Russian).
- Legostaeva, O.V. (1999). About an optimal scheme

- of calculation of double integrals at the solution of direct tasks of gravimetry and magnetometry. *Geofizicheskii Zhurnal*, 21(3), 127—130 (in Russian).
- Makarenko, I., Savchenko, O., Dererova, J., Murovskaya, A., Starostenko, V., Bielik, M., & Legostaeva, O. (2023). Depth structure of the Transcarpathian Depression (Ukrainian part) according to density modeling data. *Geofizicheskii Zhurnal*, 45(4), 43—83. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i4.286285> (in Ukrainian).
- Makarenko, I.B., 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 the results of 3D gravity modeling*. Kyiv: Naukova Dumka, 204 p. (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I. (1978). *Stable numerical methods in the problems of gravimetry*. Kyiv: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Bas, R.G., Butakov, G.S., & Dyadyura, V.A. (1972). *Automated System of Operational Processing of Gravimetry and Magnetometry Data*. Kyiv: Naukova Dumka, 164 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Dyadyura, V.A., & Legostaeva, O.V. (1996). Automatic construction of geophysical maps by field values in arbitrary points of the plane. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, (10), 113—118 (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Zavorotko, A.N. (1976). *Methods and program complex for solving the inverse linear problem of gravimetry on the IBM «Minsk-22»*. Kyiv: Naukova Dumka, 61 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (2006). *Computer program «3-D modeling of potential fields»*. Certificate of copyright registration for work No. 16867, registration date 06.06.2006 (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I., Legostaeva, O.V., Makarenko, I.B., Pavlyuk, E.V., & Sharypanov, V.M. (2004). On automated input into the computer images of geological and geophysical maps with discontinuities of the first kind and visualization of three-dimensional interactive geophysical models and their fields. *Geofizicheskii Zhurnal*, 26(1), 3—13 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Legostaeva, O.V., Makarenko, I.B., & Savchenko, A.S. (2015). Software system for automated data interpretation of potential fields (GMT-Auto). *Geofizicheskii Zhurnal*, 37(1), 42—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322> (in Russian).
- Starostenko, V., Makarenko, I., Savchenko, O., Kuprienko, P., & Legostaeva, O. (2022). Three-dimensional density model of the Tarasivka structure of the Golovanivsk suture zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskii Zhurnal*, 44(2), 135—151. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256269> (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I., Manukyan, A.G., & Zavorotko, A.N. (1986). *Methodology for solving direct problems of gravimetry and magnetometry on spherical planets*. Kyiv: Naukova Dumka, 112 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Matsello, V.V., Aksak, I.N., Kuleshov, V.A., Legostaeva, O.V., & Egorova, T.P. (1997). Automation computer input image geophysical maps and building their digital models. *Geofizicheskii Zhurnal*, 19(1), 3—13 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Sharypanov, V.M., Savchenko, A.S., Legostaeva, O.V., Makarenko, I.B., & Kuprienko, P.Ya. (2011). On the automated interactive processing of graphic images of geological and geophysical objects. *Geofizicheskii Zhurnal*, 33(1), 54—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i1.2011.117325> (in Russian).
- Starostenko, V.I., Sharypanov, V.M., Sharypanov, A.V., Savchenko, A.S., Legostayeva, O.V., Makarenko, I.B., & Kuprienko, P.Y. (2016). Interactive software package Isohypse for three-dimensional geological and geophysical models, and its practical use. *Geofizicheskii Zhurnal*, 38(1), 30—42. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107720> (in Russian).
- Bielik, M., Krajňak, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Starostenko, V., Bošanský, M., Grinè, M., & Hók, J. (2013). 3D gravity interpretation of the pre-Tertiary basement in the intramontane depressions of the Western Carpathians: a case study from the Turiec Basin. *Geologica Carpathica*, 64(5), 399—408. <https://doi.org/10.2478/geoca-2013-0027>.
- Bielik, M., Makarenko, I., Csicsay, K., Legostaeva,

- va, O., Starostenko, V., Savchenko, A., Simonova, B., Dererova, J., Fojtikova, L., Pasteka, R., & Vozar, J. (2018). The refined Moho depth map in the Carpathian-Pannonian region. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 48(2), 179—190. <https://doi.org/10.2478/congeo-2018-0007>.
- Bielik, M., Zeyen, H., Starostenko, V., Makarenko, I., Legostaeva, O., Savchenko, S., Dérerová, J., Grinč, M., Godová, D., & Pánisová, J. (2022). A review of geophysical studies of the lithosphere in the Carpathian-Pannonian region. *Geologica Carpathica*, 73(6), 499—516. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.73.6.2>.
- Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Buryanov, V.B., Makarenko, I.B., Orlyuk, M.I., Skobelev, V.M., Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (2004). The 1.80—1.74-Ga gabbro-anorthosite-rapakivi Korosten Pluton in the Ukrainian Shield: a 3-D geophysical reconstruction of deep structure. *Tectonophysics*, 381, 5—27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.023>.
- Dirkzwager, J.B., Stephenson, R.A., & Legostaeva, O.V. (2000). The pre-Permian residual gravity field for the Dutch onshore and adjacent offshore. *Global and Planetary Change*, 27(1-4), 53—66. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00059-5).
- Krajňak, M., Bielik, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Starostenko, V., & Bošanský, M. (2012). The first stripped gravity map of the Turci-anska Kotlina Basin. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 181—199. <https://doi.org/10.2478/v10126-012-0017-4>.
- Starostenko, V.I., Kutas, R.I., & Legostaeva, O.V. (2003). Solution of stationary geothermal forward problems for an inhomogeneous vertical rectangular, arbitrarily truncated prism. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 39(12), 1021—1028.
- Starostenko, V.I., & Legostaeva, O.V. (1998). Calculation of the gravity field from an inhomogeneous, arbitrarily truncated vertical rectangular prism. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 34(12), 991—1003.
- Starostenko, V.I., Shuman, V.N., Ivashchenko, I.N., Legostaeva, O.V., Savchenko, A.S., & Skrinik, O.Ya. (2009). Magnetic fields of 3-D anisotropic bodies: theory and practice of calculations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 45(8), 640—655. <https://doi.org/10.1134/S1069351309080047>.
- Starostenko, V.I., Zavoisky, V.N., & Legostaeva, O.V. (2005). The forward problem of magnetic survey for 3-D bodies of complex configuration with anisotropic magnetic susceptibility. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 41(7), 585—593.
- Szalaiová, E., Bielik, M., Makarenko, I., Legostaeva, O., Hók, J., Starostenko, V., Šujan, M., & Šefara, J. (2008). Calculation of a stripped gravity map with a high degree of accuracy: a case study of Liptovská Kotlina Basin (Northern Slovakia). *Geological Quarterly*, 52(2), 103—114.