

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ІМЕНІ С.І.СУББОТІНА**

ЛЕГОСТАЄВА ОЛЬГА ВАДИМІВНА



УДК: 004.42:530.83

**МАТЕМАТИЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ 3D ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ
ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ПОЛІВ (GMT-AUTO)**

04.00.22 – геофізика
103 – Науки про Землю

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

КИЇВ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,
академік НАН України

Старостенко Віталій Іванович,
директор Інституту геофізики
імені С.І. Субботіна НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
Петровский Олександр Павлович,
директор Товариства з обмеженою відповідальністю
«Науково-технічна компанія «ДЕПРОІЛ ЛТД»

доктор фізико-математичних наук,
Тульчинський Вадим Григорович,
завідувач відділу автоматизації програмування
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України

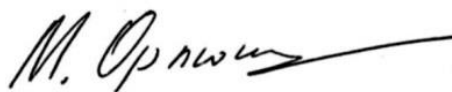
доктор фізико-математичних наук, професор,
Міліневський Геннадій Петрович,
головний науковий співробітник фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса
Шевченка

Захист відбудеться 29 вересня 2021 року о 10.00 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Академіка Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геофізики імені С.І.Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Академіка Палладіна, 32 та на електронному ресурсі: <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розіслано 20 серпня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01
доктор геологічних наук, професор



М.І.Орлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Обробка результатів геофізичних спостережень і, особливо, їх геолого-геофізична інтерпретація потребують виконання великих обсягів складних розрахунків. Раніше, до часів появи електронних засобів, розроблялись різні графічні методи, які унеможливлювали виконання розрахунків з необхідною точністю, але давали змогу отримувати результати досить оперативно із точністю, що в минулому задовольняла досвідчених фахівців. Для цього розроблялись різні палетки, графічні методи та ін. (Сорокин, 1953). З появою електронних розрахункових машин ситуація різко змінилась. По-перше, з'явилися автоматизовані системи оперативної обробки результатів, наприклад, гравіметричних та магнітометричних польових спостережень (Старостенко и др., 1972). По-друге, почали формуватися і розроблятися принципи та проекти створення математичного забезпечення для кількісної інтерпретації геофізичних полів (Алексидзе и др., 1984). Цей напрям досліджень складний і об'ємний. До теперішнього часу багато зроблено, зокрема, і авторкою дисертації. Основні результати її робіт покладені в основу цієї дисертації. Крім того, треба підкреслити, що геофізичні матеріали подаються у графічному вигляді (карти, розрізи, графіки та ін.), тому перше, що потрібно зробити – це забезпечити автоматичне перетворення графічної інформації у цифрову. Після обробки цієї інформації необхідно вміти робити зворотню процедуру – результати автоматично перетворити у відповідні карти та інше.

Враховуючи сказане та беручи до уваги назву дисертації, стає очевидним, що робота присвячена дуже актуальній, сучасній проблемі, рішення якої сприяє прогресу у використанні геофізичних методів для різних наукових та прикладних завдань геофізики, геології, екології та ін.

Основні положення та завдання, які вирішуються в дисертації:

- 1) автоматичне введення в комп'ютер зображень різних геофізичних карт та представлення їх у цифровому вигляді;
- 2) розробка програм рішення прямих задач гравіметрії, магнітометрії та геотермії для тіл, набором яких апроксимуються реальні геологічні структури, що вивчаються;
- 3) об'єднання всіх розроблених програм в автоматизовану систему 3D кількісної інтерпретації даних потенціальних полів;
- 4) ілюстрація прикладів застосування системи для вивчення глибинної будови реальних різноманітних геологічних структур.

Виконані дослідження спираються як на оригінальні авторські розробки, так і розвивають та узагальнюють роботи інших авторів (Аронов и др., 1971; Петров и др., 2005; Бычков, 2010; Долгаль, 2014; Бычков и др., 2015, Шлезингер, 1989; Роджерс, Адамс, 2001; Шлезингер, Главач, 2004).

Структура дисертації відповідає послідовності роботи геофізика з автоматизованою системою.

Перший розділ роботи присвячено викладенню алгоритмів та опису програм введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт.

Подальші розділи роботи присвячені характеристиці математичних алгоритмів вирішення прямих задач гравіметрії, магнітометрії та стаціонарної задачі геотермії.

Далі викладено опис комплексу для візуалізації в інтерактивному режимі тривимірних геофізичних моделей та їх полів, а також комплексу програм для автоматизованої системи 3D інтерпретації даних потенціальних полів (GMT–Auto).

Окремий розділ дисертації присвячено прикладам застосування системи для вивчення глибинної будови реальних геологічних об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на базі відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії Інституту геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України за наступними науковими темами у відповідності з науковою тематикою: 1) *фундаментальні теми*: “Побудова та інтерпретація об'ємної щільнісної моделі літосфери Донбасу та прилеглих структур на підставі геолого-геофізичних даних” (2001-2005), № держ. реєстрації 0101U000444; “Дослідження глибинної будови Чорного моря методом тривимірного гравітаційного моделювання” (2002-2006), № держ. реєстрації 0102U000488; “Комплексне геолого-геофізичне вивчення глибинної будови південно-західної окраїни Східно-Європейської платформи з метою розширення мінерально-сировинної бази України” (2006-2010), № держ. реєстрації 0106U000911; “Побудова тривимірної геолого-геофізичної моделі південної окраїни Східно-Європейської платформи та її обрамлення з метою розширення мінерально-сировинної бази України” (2011-2015), № держ. реєстрації 0111U000236; “Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної безпеки” (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003046; “Геологічна будова Побузького гірськорудного району за сучасними геофізичними і геологічними даними та оцінка його перспектив на корисні копалини” (2016-2020), № держ. реєстрації 0116U006203; “Комплексне геофізичне дослідження літосфери України: від моделей до процесів формування родовищ корисних копалин” (2016-2020), № держ. реєстрації 0116U000131; “Роль мантийних процесів у формуванні структури земної кори і родовищ корисних копалин в Україні” (2017-2021), № держ. реєстрації 0117U000373; “Глибинна будова літосфери та процеси формування родовищ корисних копалин України і суміжних регіонів” (2021-2025), № держ. реєстрації 0121U107661; 2) *конкурсні роботи*: “Створення комплексної тривимірної геофізичної моделі літосфери в зв'язку з магматизмом, тектонікою та утворенням корисних копалин Українського щита” (2002-2006), № держ. реєстрації 0102U002478; “Геофізичні дослідження літосфери вздовж профілю Маріуполь-Феодосія-Чорне море” (DOBRE-2) (2004-2005), № держ. реєстрації 0104U004858; “Геофізичні і геодинамічні критерії виділення площ, перспективних на енергетичні та мінеральні ресурси і алмази” (2007-2009), № держ. реєстрації 0107U006543; “Вивчення глибинної будови та геодинамічного розвитку літосфери північно-західної частини Східно-Європейської платформи у зв'язку з перспективами нафтогазоносності” (DOBRE-3) (2008), № держ. реєстрації 0108U004822; “Геофізичні дослідження літосфери зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ у зв'язку з перспективами нафтогазоносності” (DOBRE-4) (2009), № держ. реєстрації 0109U002947; “Глибинна будова і

геодинаміка наскрізних широтних зон розломів для оцінки перспектив пошуку корисних копалин” (2007-2011), № держ. реєстрації 0107U002193; “Моніторинг геофізичних полів з метою зниження ризиків від небезпечних природних явищ на території України” (2007-2011), № держ. реєстрації 0107U002195; “Закономірності розміщення родовищ стратегічних мінеральних ресурсів на території України та геофізичні і геодинамічні критерії їх пошуків” (2010-2012), № держ. реєстрації 0110U004267; “Створення міжрегіонального вузла збору даних з обслуговування Російсько-Українського сегменту світової сітки геомагнітних обсерваторій ІНТЕРМАГНЕТ” (2010-2011), № держ. реєстрації 0110U0004268; “Особливості будови літосфери і характеру сучасної сейсмічності крупних геологічних провінцій південно-західного сегменту Східно-Європейської платформи: Українського щита, Воронезького кристалічного масиву і розділяючої їх Дніпрово-Донецької западини” (2010-2011), № держ. реєстрації 0110U004270; “Просторово-часова структура магнітного поля Землі на її поверхні та у ближньому космосі (у зв’язку з сонячною активністю та порами року)” (2011), № держ. реєстрації 0111U006652; “Мультипараметричний підхід для оцінки прояву природних катастроф” (2012-2013), № держ. реєстрації 0112U003456; “Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії” (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003451; “Геодинамічний розвиток літосфери України та формування і розміщення родовищ корисних копалин” (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003044; “Глибинна будова та геодинамічний розвиток Інгульського мегаблоку Українського щита у зв’язку з пошуками стратегічних видів корисних копалин” (2013-2015), № держ. реєстрації 0113U002502; “Комплексне геофізичне вивчення глибинної будови, складу і еволюції земної кори з метою визначення вуглеводного ресурсного потенціалу Азово-Чорноморського регіону” (2013-2015), № держ. реєстрації 0113U004152; “Розширення Російсько-Української мережі спостережень за геомагнітним полем та вдосконалення міжрегіонального вузла збору даних” (2012-2013), № держ. реєстрації 0112U003455; “Удосконалення моделей варіацій геомагнітного поля з використанням нових даних обсерваторій Російсько-Українського сегменту мережі INTERMAGNET” (2014-2015), № держ. реєстрації 0114U000939; “Сейсмічні дослідження літосфери Центрального та Північного регіонів України для оцінки перспектив нафтогазоносності (GEORIFT)” (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003450; “Узагальнення та аналіз геофізичних даних для Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ України” (TESZ Етап 2017), № держ. реєстрації 0117U000779; “Експериментальні дослідження методами глибинного сейсмічного зондування та магнітотелуричного зондування вздовж профілю Хотин-Львів-Варшава” (TESZ етап 2018), № держ. реєстрації 0118U003711; “Розробка методики тривимірного геолого-геофізичного моделювання перспективних локальних геологічних структур Побузького гірськорудного району з метою побудови їх детальних геологічних карт” (2018-2019), № держ. реєстрації 0118U001917; “Експериментальні дослідження методами глибинного сейсмічного зондування та магнітотелуричного зондування вздовж профілю Люблін-Ковель-Київ” (TESZ етап 2019), № держ. реєстрації 0119U001745;

“Створення програмно–апаратного сейсмічного комплексу для розв’язку фундаментальних та прикладних задач геофізики” (2018), № держ. реєстрації 0118U001749; “Створення багатофункціонального апаратно–методичного сейсмічного комплексу” (2019), № держ. реєстрації 0119U002818; “Виділення та поглинання парникових газів на теренах України, визначення глибинних розломів як основних провідників їх дегазації за геофізичними даними” (2019), № держ. реєстрації 0119U001822; “Побудова детальної геологічної карти Тарасівського базитового масиву Голованівської шовної зони на основі тектонофізичного і густинного моделювання з метою визначення його перспектив на рідкісні метали і апатити” (2018-2019), № держ. реєстрації 0118U001916; “Системне виявлення та регіональний аналіз розломних структур-провідників парникових газів, деталізація і оцінка окремих структур глибинного походження” (2020), № держ. реєстрації 0120U103003; “Створення геолого-геофізичних моделей літосфери зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ України” (TESZ етап 2020), № держ. реєстрації 0120U102470; “Геодинамічний розвиток Українських Карпат та формування родовищ корисних копалин за результатами новітніх геолого-геофізичних даних” (2020-2021), № держ. реєстрації 0120U000189; 3) *прикладні роботи*: “Розробка методики прогнозу вуглеводневого потенціалу українського сектора Чорного моря на основі детального комплексного тривимірного геофізичного моделювання геологічного середовища газових полів” (2004-2009), № держ. реєстрації 0104U004781; “3D геофізичні моделі структур верхньої частини земної кори перехідної зони від Східно-Європейської платформи до Чорноморської мегазападини у зв’язку з прогнозуванням корисних копалин та оцінкою екологічного стану довкілля” (2011-2013), № держ. реєстрації 0111U000233; “Прогнозування шляхів міграції та місць накопичення вуглеводнів Дніпровсько-Донецького авлакогену за результатами 3D геофізичного моделювання” (2014-2016), № держ. реєстрації 0114U000235; “3D геофізичні моделі літосфери перехідної зони від Східно-Європейської платформи до Альпійського поясу у зв’язку з прогнозуванням корисних копалин та оцінкою екологічного стану довкілля” (2017-2019), № держ. реєстрації 0117U000119; “Створення програмно – апаратного сейсмічного комплексу для розв’язку фундаментальних та прикладних задач геофізики” (2018), № держ. реєстрації 0118U001749; “Створення багатофункціонального апаратно–методичного сейсмічного комплексу” (2019), № держ. реєстрації 0119U002818; “Геофізичне дослідження літосфери південного заходу Східноєвропейської платформи та її обрамлення у зв’язку з глибинною дегазацією з метою виявлення шляхів міграції флюїдів” (2020-2022), № держ. реєстрації 0120U000108; 4) *грант для молодих вчених*: “Створення автоматизованої системи інтерпретації комплексу геофізичних даних та її використання для вивчення глибинної будови Чорноморської западини” (2003-2004), № держ. реєстрації 0103U006248.

Мета дослідження – створення нової автоматизованої системи кількісної інтерпретації даних потенціальних полів, її практичне випробування на прикладах основних геологічних структур України, а також деяких структур зарубіжжя.

Основні завдання дослідження:

- 1) розробка нових алгоритмів та програм автоматизованого введення в комп'ютер геолого-геофізичної інформації, заданої в графічній формі;
- 2) рішення прямих задач гравіметрії, магнітометрії та геотермії для геологічних структур;
- 3) навести приклади практичного застосування створеної автоматизованої системи.

Об'єкт дослідження – теорія і методи створення алгоритмів та програм автоматизованої системи кількісної інтерпретації даних потенціальних полів.

Предмет дослідження – геологічні структури України та зарубіжжя.

Методи дослідження та достовірність і обґрунтованість отриманих результатів і висновків:

- 1) розробка теорії, алгоритмів та програм автоматизованого введення в комп'ютер графічних зображень геолого-геофізичної інформації;
- 2) теорія, алгоритми та програми рішення прямих задач гравіметрії, магнітометрії та геотермії для реальних геологічних тіл;
- 3) апробація фрагментів автоматизованої системи на модельних тестових прикладах;
- 4) створення раціональної методики практичного застосування автоматизованої системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

- 1) розроблено новий програмний комплекс автоматизованої інтерпретації гравітаційного, магнітного і теплового полів (GMT–Auto), що дозволяє за заданими полями будувати тривимірні моделі з безперервним розподілом в них фізичних параметрів;
- 2) розроблено основні принципи роботи створених програмних комплексів *Geophys0*, *SpaceMap*, *Isohypse*, які призначені для автоматизації введення в комп'ютер геолого-геофізичних карт із подальшим перетворенням даних у цифровий вигляді;
- 3) показано, що гравітаційні задачі В.М. Новоселицького та Б.В. Нумерова об'єднуються і узагальнюються, якщо пласт апроксимувати набором довільно зрізаних неоднорідних вертикальних прямокутних призм;
- 4) вперше дано рішення прямої задачі магнітометрії для довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми і чотирикутної зрізаної піраміди з анізотропною і ізотропною магнітною сприйнятливістю;
- 5) для неоднорідної довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми вперше дано розв'язок прямих стаціонарних задач геотермії в однорідному півпросторі щодо розподілу тепла і теплового потоку;
- 6) сформульована і строго вирішена узагальнена стаціонарна одномірна задача геотермії Релея–Тихонова для сукупності горизонтальних нескінченних плоскопаралельних шарів;
- 7) створено комплекс “ПЕРЕГЛЯД” і програму UnionMaps та показано, що спільно з технологічними комплексами вирішення різних геофізичних завдань вони

дають змогу продуктивно виконувати інтерпретацію геофізичних даних методом підбору;

8) на конкретних прикладах продемонстровано широке застосування створеної нової автоматизованої системи (GMT–Auto) при вирішенні практичних завдань, які пов'язані з вивченням складної будови різних геологічних структур за геофізичними даними.

Практичне значення отриманих результатів. Створена автоматизована система орієнтована на практичне використання як в наукових, так і в промислових геофізичних організаціях.

Побудовані моделі реальних геологічних структур можуть бути використані при вирішенні практичних завдань геології, тектоніки, а також при пошуках корисних копалин.

Автоматизована система (GMT–Auto) знайшла широке застосування при вирішенні практичних завдань, які пов'язані з вивченням складної будови різних геологічних структур за геофізичними даними. За її допомогою побудовані, зокрема, нові тривимірні густинні моделі осадових басейнів (Дніпровсько-Донецької западини і Донбасу, Прип'ятського прогину, Карпатсько-Паннонського регіону, Чорноморської западини, північно-західного шельфу Чорного моря), щитів (Українського, Балтійського) і Воронезького кристалічного масиву.

Дослідження виконувались в: Інституті геофізики НАНУ (Київ), Геофізичному відділі Інституту наук про Землю Словацької академії наук (м.Братіслава), Інституті геофізики Польської академії наук (м. Варшава), Інституті геофізики В'єтнамської академії наук та технологій (В'єтнам, м.Ханой), Геофізичному інституті Болгарської академії наук (м.Софія), Вільному університеті (Нідерланди, м. Амстердам).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто та опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук за спеціальністю «геофізика» та в престижних загальнонавчаних геофізичних журналах за кордоном, а також в 3 колективних монографіях та 1 свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір. За темою дисертації автором опубліковано 105 наукових праць: 3 монографії, статей – 43 (27 входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science), 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір та 58 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях та симпозіумах. *h-index* – 10 за даними Web of Science, кількість посилань – 405.

У серії робіт, присвячених вивченню глибинної будови Землі [Starostenko et al., 2013, 2015, 2017], здобувачці належить збір та систематизація отриманих польових сейсмічних записів, участь в розрахунках 2D густинних моделей уздовж профілів.

У роботі [Dirkzwager et al., 2000], яка виконана у Вільному університеті (м.Амстердам) з метою визначення внеску в спостережене поле ефектів трьох послідовно залягаючих геологічних шарів при 3D гравітаційному моделюванні літосфери морської та прибережної частин Нідерландів, здобувачкою створена програма та проведено розрахунки 3D гравітаційної моделі, а також взято участь у підготовці висновків.

У серії робіт, присвячених побудові 3D гравітаційних моделей осадового чохла Карпатсько-Паннонського регіону і його окремих структур (Ліптовської та Тульчанської западин) з метою отримання залишкового гравітаційного поля, яке відображає густинні неоднорідності консолидованої частини кори [Bielik et al., 2004, 2005, 2013, 2018, 2019; Szalaiová et al., 2008; Krajnak et al., 2012], здобувачкою створено технологію та програми для побудови 3D гравітаційних моделей для досліджуваних регіонів, виконано збір геолого-геофізичних даних, проведено підготовка карт для розрахунку гравітаційних ефектів та моделей, взято участь у геологічних висновках.

У роботах [Старостенко и др., 2004а, 2011, 2016], які присвячені створенню комплексів програм для автоматизованого введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт, здобувачкою взято участь в постановці задачі, створенні математичних алгоритмів та оптимізації їхньої роботи, опробуванні програм на тестових та реальних прикладах.

Створене здобувачкою програмно-алгоритмічне забезпечення для автоматизованої системи GMT–Auto описано в публікаціях [Старостенко и др., 2015] та в Свідоцтві про реєстрацію авторського права [Старостенко и др., 2006].

У роботі [Старостенко и др., 2003а] яка присвячена дослідженню густини осадових комплексів для Чорного моря, здобувачкою проаналізовано вимірювання густини для зразків з 20 свердловин, за допомогою математичних програм побудовані графіки функцій та отримані узагальнені формули $\rho(H)$ для відкладів майкопської серії.

У роботах [Старостенко и др., 2003б, 2006] здобувачкою особисто створено програму для розв'язання прямих стаціонарних задач геотермії, коли коефіцієнт теплопровідності λ в призмі постійний, а густина теплогенерації 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 в вершинах призми густина теплогенерації приймає задані значення. Також запропоновано рішення для стаціонарної одновимірної задачі геотермії.

У роботах [Старостенко и др., 2005, 2009, 2013] здобувачкою запропоновано алгоритм розв'язання прямої задачі магнітометрії для довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми і чотирикутної піраміди з анізотропною магнітною сприйнятливістю, особисто розроблено та протестовано програмне забезпечення.

У роботах [Старостенко и др., 2004б, 2008] здобувачкою особисто розроблено програму для рішення та візуалізації 2D прямої задачі гравіметрії, а також проведено аналіз сейсмічних даних та розрахунки гравітаційної моделі вздовж профілю DOBRE.

У роботах [Макаренко и др., 2003; Bogdanova et al., 2004], присвячених вивченню будови земної кори Коростенського плутону, здобувачка брала участь в розрахунках 3D гравітаційних моделей, а також у підготовці висновків.

У серії робіт, проведених з метою побудови схем розломної тектоніки північно-західного та північно-східного шельфів Чорного моря і Чорноморської мегазападини [Старостенко и др., 2005, 2010; Starostenko et al., 2004, 2015, 2019, 2020], здобувачкою виконано аналіз вхідної інформації (у вигляді карт), розрахунки

гравітаційних ефектів для 3D моделей різного масштабу за допомогою автоматизованої системи GMT–Auto та візуалізацію отриманих результатів з урахуванням відомих програмних продуктів.

У роботах [Куприенко и др., 2007а, б, 2010; Старостенко и др., 2012, 2015, 2017, 2018], які присвячені вивченню гравітаційних аномалій території України, здобувачкою проведено адаптацію автоматизованої системи GMT–Auto для побудови 3D гравітаційних моделей кожного досліджуваного району та розрахунки гравітаційних ефектів для кожного шару та для сумарної моделі, а також взято участь у підготовці висновків.

У роботах [Бурьянов и др., 2000, Егорова и др. 2000], в яких представлено 3D гравітаційні моделі Прип'ятського прогину та ДДЗ, здобувачкою виконано розрахунки 3D гравітаційних моделей за самостійно створеною програмою 3D моделювання потенціальних полів, виконано візуалізацію результатів у графічному вигляді.

У серії робіт [Sumaruk et al., 2011; Кудин и др., 2021], де описано шлях входження геомагнітних обсерваторій в міжнародну мережу найкращих обсерваторій світу INTERMAGNET та приведено опис системи пришвидшеної підготовки квазікінцевих даних стандарту INTERMAGNET, здобувачкою взято участь у підготовці даних з українських геомагнітних обсерваторій, що входять в мережу INTERMAGNET, виконано побудову графіків та рисунків, а також взято участь у підготовці висновків.

У роботі [Гвишиани и др., 2015], в якій зроблено аналіз геомагнітної і сонячної активності в 19-24 циклах, здобувачка брала участь в опрацюванні даних для побудови графіків з геомагнітних обсерваторій та в інтерпретації результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на міжнародних і регіональних конференціях та семінарах у формі усних та стендових доповідей: Міжнародній конференції-семінарі ім. Д. Г. Успенського “Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей” 2000 (Москва), 2001 (Москва), 2006 (Єкатеринбург), 2008 (Ухта), 2012 (Воронеж), 2013 (Москва), 2019 (Перм); International Geophysical Conference&Exposition, Romanian Geophysics, 2000; Joint meeting of the EUROBRIDGE and SVEKALAPK Oprojectson “Archean and Proterozoic Plate Tectonics: Geological and Geophysical Records”, 2001 (St.- Petersburg); European Geosciences Union, 25th General Assembly, 2000 (France); V Міжнародній конференції “Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона”, 2002 (Гурзуф); 2nd Workshop on International Gravity Field Research, 2006 (Smolenice, Slovak Republic); VII Міжнародній конференції “Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазоносных регионов Украины”, 2007 (Сімферополь); XIV Міжнародній конференції “Связь поверхностных структур земной коры с глубинными”, 2008 (Петрозаводськ, Росія); European Geosciences Union General Assembly, 2008 (Vienna, Austria); VIII, X Міжнародних конференціях “Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа” 2009, 2012 (Крим); 2nd International Symposium on the

Geology of the Black Sea Region (ISGB), 2009 (Анкара, Туреччина); XVI Міжнародній конференції “Свойства, структура, динамика и минералогения литосферы Восточно-Европейской платформы”, 2010 (Вороніж); International Conference “Geodynamical Phenomena: From Observations and Experiments to Theory and Modelling”, 2010 (Київ); International Workshop “Artificial Intelligence in the Earth’s Magnetic Field Study. INTERMAGNET Russian Segment” 2011 (Калуга, Росія); European Geosciences Union General Assembly 2013 (Відень, Австрія); Partnership conference “Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining”, 2013 (Калуга, Росія); 7th Bg GS National Conference With International Participation “GEOPHYSICS 2015”, (Sofia, Bulgaria); 11th Slovak Geophysical Conference, 2015 (Bratislava, Slovak Republic); Конференції “Геологія і корисні копалини України”, 2018 (Київ); Geologica Carpathica 70 Conference, 2019 (Bratislava, Slovak Republic).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 343 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 282 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями та 121 рисунком. Список використаних джерел містить 338 найменувань.

Подяки. Дисертація виконана в Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України. Авторка дисертаційної роботи висловлює щирі подяки своєму науковому консультанту – академіку НАН України В.І. Старостенку за багаторічну плідну співпрацю, постановку завдань, надання допомоги при теоретичних дослідженнях, всебічну підтримку і постійну увагу при виконанні роботи.

Авторка висловлює величезну подяку головному науковому співробітнику, доктору геол.-мін. наук, професору О.М. Русакову за консультації та цінні поради, багаторічні спільні дослідження та підтримку при виконанні роботи. Здобувачка також вдячна член-кореспонденту НАН України Р.І. Кутасу за спільні роботи та обговорення багатьох питань при написанні даної роботи.

Протягом 2000-2021 рр. для авторки було дуже корисним співробітництво з професором, доктором Мирославом Бієліком (Геофізичний відділ Інституту наук про Землю Словацької академії наук) в рамках спільних міжнародних наукових проєктів, якому також висловлюється щира вдячність і подяка.

Авторка дякує А.М. Логвиновій, І.А. Калітовій та О.І. Ченчик (Інститут геофізики НАНУ) за підтримку і допомогу.

Нарешті, авторка глибоко вдячна чоловікові, сину та мамі за їх підтримку протягом всього часу підготовки даної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено загальну характеристику роботи, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано мету роботи, завдання і методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні наукові та практичні досягнення здобувачки, а також подано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами Інституту, апробації одержаних результатів, публікацій, структури та обсягу роботи.

У першому розділі «Автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт» дано опис основних принципів роботи програм автоматичного перетворення графічної інформації в цифрову.

Автоматизована інтерактивна обробка різної інформації і її візуалізація – один з напрямів комп'ютерної графіки, що активно розвиваються (Аронов и др., 1971; Петров и др., 2005; Бычков, 2010; Долгаль, 2014; Бычков и др., 2015). Створення потужних, сучасних банків даних – актуальне завдання, далеке від свого повного вирішення. Геофізичні матеріали подаються в графічному вигляді (різні карти, розрізи, графіки та ін.), тому перше, що потрібно зробити – це забезпечити автоматичне перетворення графічної інформації в цифрову. Після обробки цієї інформації необхідно вміти зробити зворотну процедуру – результати автоматично перетворити в відповідні карти та ін.

Геологічні карти, карти рельєфу та інші зазвичай містять зображення функцій з розривами першого роду (розломи, обриви, зрушення та ін.). Крім того, при побудові тривимірних геофізичних моделей інтерпретатору бажано переглядати і коригувати їх з різних точок огляду, причому виконувати це зручним, простим способом. Для вирішення перерахованих вище завдань (введення в комп'ютер за допомогою сканера карт з розривами першого роду, візуалізація тривимірних геофізичних моделей) створені відповідні програмні комплекси. При розробці комплексів особлива увага приділялася їхньому «дружньому інтерфейсу», тобто тому, щоб вони були максимально зручними для користувача (задавали питання в разі якихось невизначеностей, попереджали про деякі допущені помилки та ін.).

У підрозділі 1.1. розглянуто принципи роботи програмного комплексу *Geophys0* (рис.1.1), який створено для автоматизованої інтерактивної обробки чорно-білих зображень геолого-геофізичних даних, головним змістом яких є інформація щодо ізоліній і їх розривів першого роду (розломи, обриви, тощо).

Комплекс призначено для автоматизованої інтерактивної обробки зображень геофізичних полів, головним змістом яких є карти в ізолініях. Програма *Geophys0* виконує наступні функції: 1) виклик комплексу *TEREMKI* для отримання вхідних даних; 2) зчитування з жорсткого диска вхідних даних; 3) автоматичний пошук рамки, яка визначає границі геофізичного поля; 4) автоматичне приведення рамки поля до прямокутного виду; 5) інтерактивне введення розривів першого роду – розломів та інших специфічних ліній геологічних або геофізичних карт; 6) автоматичний пошук ізоліній згідно з формалізованим описом типів ізоліній; 7) інтерактивне введення значень ізоліній в діалоговому вікні введення; 8) контроль правильності формату значень ізоліній, що вводяться; 9) автоматичний пошук спотворень векторного опису зображення; 10) ручне редагування первинного векторного опису зображення; 11) автоматичний запис на жорсткий диск проміжних результатів обробки карт; 12) зчитування з жорсткого диска проміжних результатів для продовження обробки; 13) візуалізація результатів обробки карт; 14) виправлення в інтерактивному режимі помилково введенних значень ізоліній; 15) автоматичний запис на жорсткий диск вихідних даних знайдених ізоліній; 16) автоматичне ведення архіву імен оброблених файлів і часу обробки.

Вхідні дані для програми – це два графічних файли, один з яких – растрове подання геофізичного поля, а другий – його векторний опис.

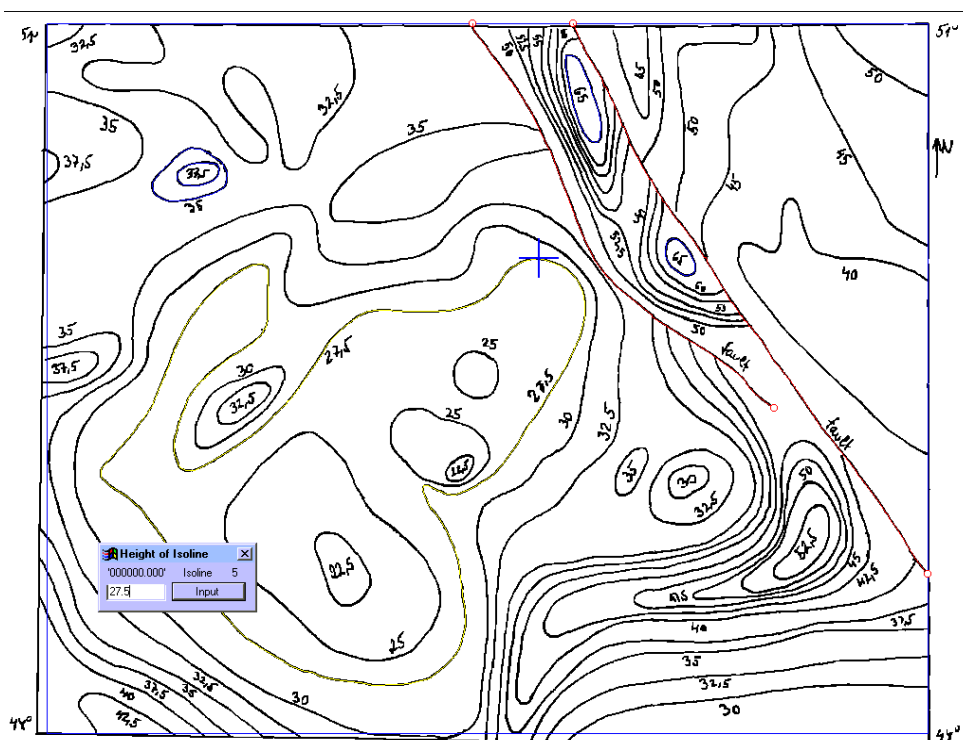


Рис. 1.1. Приклад зображення карти.

У підрозділі 1.2. розглянуто роботу програмного комплексу *SpaceMap* (рис.1.2), який створено спеціально для виконання розрахунків на кристалічних щитах, оскільки в цьому випадку в комп'ютер необхідно вводити зображення карт, основним змістом яких є не ізолінії, а тіла (області).

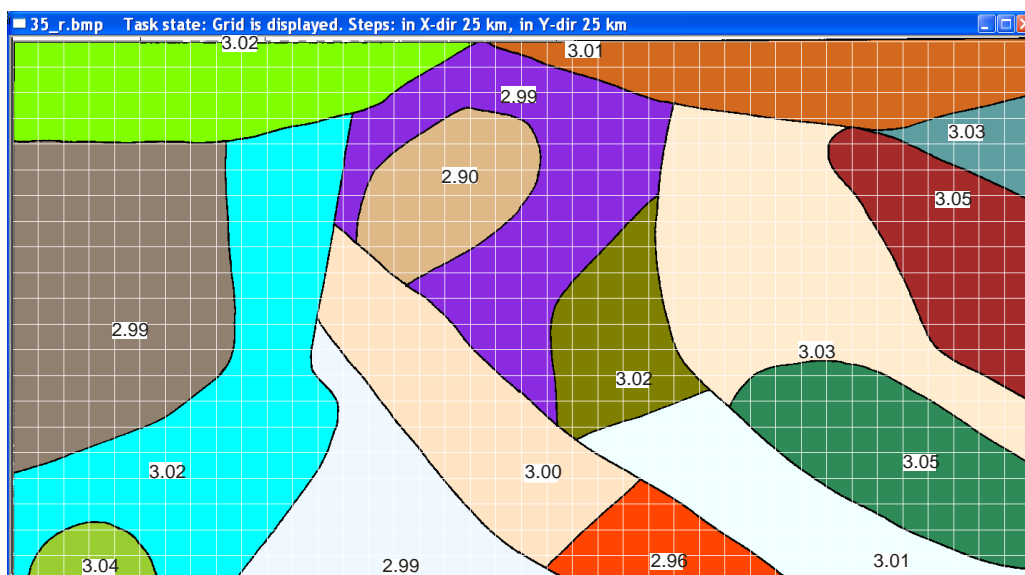


Рис. 1.2. Приклад роботи програми *SpaceMap*.

Програма призначена для автоматизованої інтерактивної обробки зображень геофізичних об'єктів, представлених у вигляді графічних монохромних Вітмар

файлів, головним змістом яких є інформація щодо областей, котрі визначаються як зв'язні множини білих пікселів, розділених чорними лініями.

Процес обробки зображення полягає в знаходженні всіх областей, присвоєнні кожній з них деякого числового значення (індексу), накладання на побудоване зображення сітки (за відомими розмірами і масштабом вхідного рисунка) і визначенні індексів у вузлах сітки.

У підрозділі 1.3. Розглянуто роботу програмного інтерактивного комплексу *Isohypse* (рис.1.3), який створено з метою об'єднання раніше створених програмних продуктів, таких як *MAP* [Старостенко и др., 1997] і *Geophys0* [Старостенко и др., 2004]. Програмний комплекс *Isohypse* [Старостенко и др., 2016] призначений для створення в пам'яті комп'ютера тривимірного опису геолого-геофізичних об'єктів, представлених ізолініями і розломами (функції з розривами першого роду). Інтерактивний, тобто такий, що дозволяє обмінюватися інформацією між комп'ютером і користувачем в процесі роботи. Головною його перевагою є можливість обробляти як монохромні (чорно-білі), так і кольорові (оригінали карт) зображення об'єктів у прямокутній або географічній системах координат. Цей комплекс призначений для оцифрування геолого-геофізичних об'єктів, представлених ізолініями і розломами, тобто функціями з розривами першого роду.

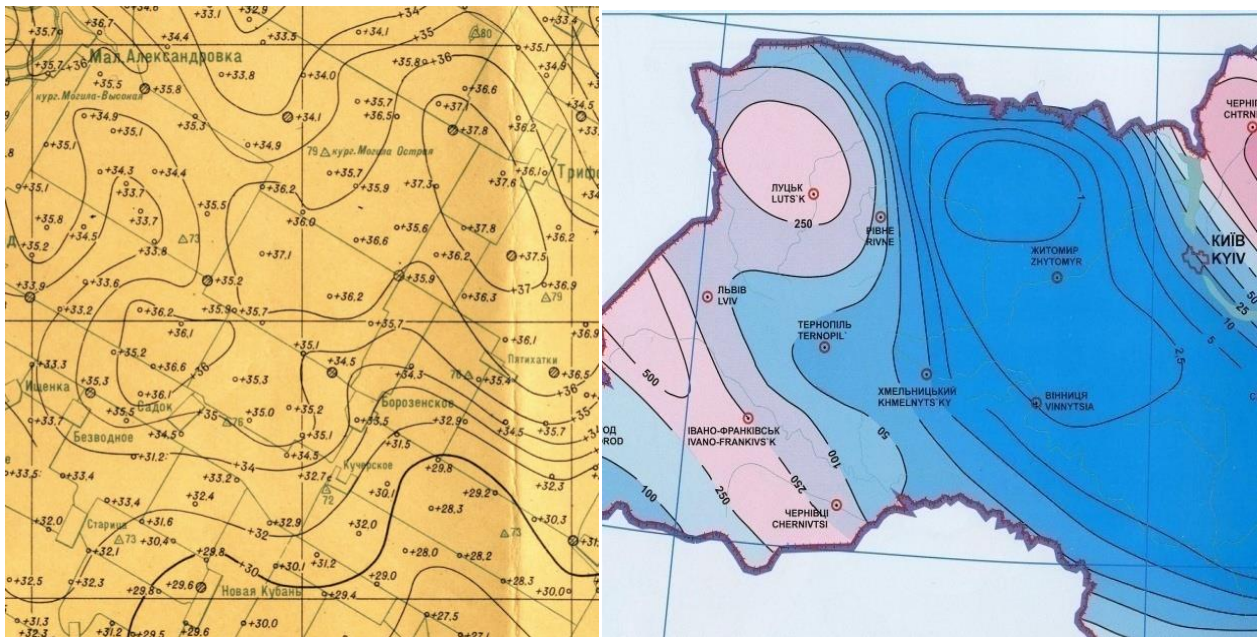


Рис. 1.3. Приклади вхідних зображень.

У другому розділі «Пряма задачі гравіметрії» дано рішення задач В.М. Новоселицького (рис. 2.1) та Б.В. Нумерова (рис. 2.2) та показано, що вони об'єднуються і узагальнюються, якщо пласт апроксимувати набором довільно зрізаних неоднорідних вертикальних прямокутних призм. За такого підходу легко моделюються тривимірні шаруваті геологічні об'єкти з практично довільною зміною густини та будь-яким розташуванням контактних поверхонь, число яких не обмежується. Підкреслимо, що зміни густини в обох випадках такі, що у вершинах призми вони приймають задані значення. Цим забезпечується безперервність розподілу густини в пласті, якщо це необхідно.

Показано, що між задачами В.М. Новоселицького та Б.В. Нумерова (незважаючи на їх близькість) є і суттєва відмінність. Перша з них враховує реальні фізико-геофізичні умови і продиктована потребами практики, тобто йде від геології.

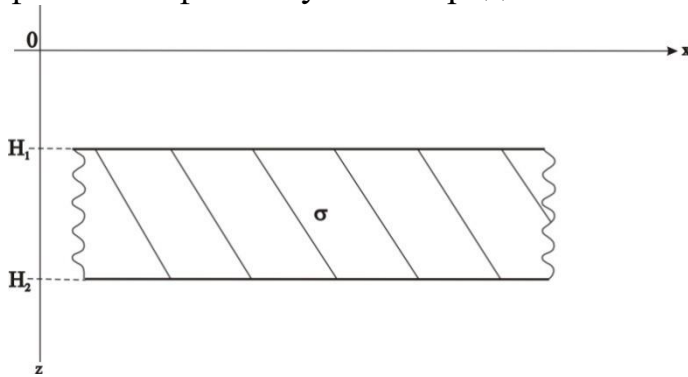


Рис.2.1. Схема розташування пласта в задачі В.М. Новоселицького.

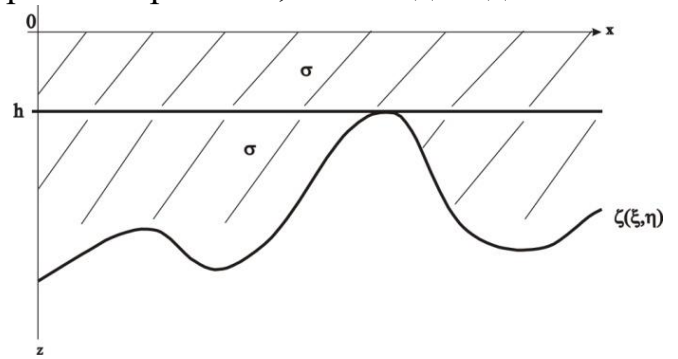


Рис.2.2. Схема розташування контактної поверхні в задачі Б.В. Нумерова.

У той же час задача Б.В. Нумерова моделює ідеальну ситуацію, що рідко зустрічається в геологічних структурах, і, як наслідок, йде від математики. Цим пояснюється той факт, що задача В.М. Новоселицького, або її узагальнення, на практиці використовується частіше, ніж класична задача щодо контактної поверхні.

Ідейний внесок В.М. Новоселицького в постановку і рішення зручної і важливої для практики задачі апроксимації пласта набором неоднорідних призм очевидний.

За допомогою викладеного узагальненого методу апроксимації шаруватих структур побудовані тривимірні густинні моделі для різних регіонів Європи [Bogdanova et al., 2004; Starostenko et al., 2004 та ін.].

У третьому розділі «Пряма задача магнітометрії» дано рішення задачі обчислення магнітних полів для довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми і чотирикутної зрізаної піраміди з анізотропною магнітною сприйнятливістю, яка всередині тіл задана як функція координат. Звідси випливає, що реалізація на практиці знайдених рішень вимагає в точках в середині тіл знання величин головних значень тензора магнітної сприйнятливості, а також кутів Ейлера [Старостенко и др., 2005]. Ці дані необхідні для обчислення складових вектора намагніченості тіл.

Визначити головні значення тензора магнітної сприйнятливості геологічних об'єктів за результатами польових експериментальних досліджень – нетривіальна, самостійна задача. Її можна спростити, якщо припустити, що в результаті виконаних спостережень в полі:

1) визначено головні значення тензора магнітної сприйнятливості у всіх вершинах розглянутих елементарних тіл, набором яких апроксимується геологічний об'єкт (призми або піраміди);

2) є підстави вважати, що кожне з головних значень тензора магнітної сприйнятливості змінюється в межах тіла за лінійним законом уздовж горизонтальних координатних осей на верхній та нижній основах, а також уздовж будь-якої вертикальної лінії, причому так, що в вершинах тіл головні значення приймають ті величини, які були задані.

Тоді побудова відповідних рівнянь для визначення головних значень тензора магнітної сприйнятливості в середині тіла ускладнень не викликає (див., наприклад, рівняння (14) з роботи [Старостенко, Легостаєва, 1998]). Однак залишаються складності з урахуванням кутів Ейлера, що змінюються в межах тіл і які необхідно задати. Очевидно, що такий підхід не може широко використовуватися на практиці через обмеженість набору експериментальних даних, хоча він досить строгий в теоретичному плані.

Найперспективнішою і простою з погляду застосування видається методика, заснована на використанні двох закономірностей, експериментально встановлених В.М. Завойським в результаті багаторічних досліджень величезного фактичного матеріалу (Завойський, Крутиховская, 1961, 1975; Завойський, 1975, 1979, 1982; Завойський, 1980, 1999; Коваленко-Завойський, Іващенко, 1995, 2002, 2003). Сформулюємо ці закономірності.

У шаруватих і сланцевих породах, зім'ятих в моноклінальні складки або сукупність монокліналей, а також у складчастих структурах, анізотропія розподілена таким чином:

1) коротка вісь тензора магнітної сприйнятливості перпендикулярна шаруватості або сланцюватості;

2) довга вісь тензора магнітної сприйнятливості субпаралельна осям (шарнірам) складок.

Використання встановлених В.М. Завойським закономірностей дає змогу позбутися необхідності апроксимації зазначених геологічних об'єктів набором елементарних тіл, що істотно скорочує обсяг необхідної підготовчої роботи, і дає можливість безпосередньо обчислювати магнітні поля від моноклінальних складок або монокліналей, які ізотропні або анізотропні, але однорідні. Це, як показано, істотно полегшує теорію і чисельне рішення задачі. Але що особливо важливо, при цьому зводиться до мінімуму обсяг необхідних даних польових спостережень.

Якщо ж доводиться мати справу з анізотропними неоднорідними об'єктами, то при обчисленні їх магнітних полів необхідно звертатися до методики, що використовує апроксимацію анізотропної структури набором однорідних елементарних тіл, тобто діяти звичайним для цієї ситуації чином (Завойський, 1978; Блох, 1987), [Старостенко и др., 2005].

Магнітна анізотропія, тобто неоднаковість магнітних властивостей тіл за різними напрямками, є складним фізичним явищем (Вонсовський, 1963). В геології і геофізиці вона почала вивчатися більш 40 років тому. На сьогодні встановлено, що магнітна анізотропія не інваріантна відносно форми тіла, пов'язана зі структурно-текстурною особливістю порід (кристалографічною текстурою і текстурою форми, об'ємним вмістом феромагнетиків, шаруватістю залізистих порід, їх деформацією та ін.) Як наслідок, магнітна анізотропія властива для деформованих порід і мінералів кристалічного фундаменту, арктичних морських осадових, лесоподібних суглинків і палеогрунтових горизонтів, залізо-кремністих формацій і використовується при вирішенні завдань структурної геології, петрофізики, вивченні палеотектонічних режимів архею і нижнього протерозою. Неврахування магнітної анізотропії в

магніторозвідці може призводити до грубих помилок при інтерпретації спостереженого магнітного поля (Завойський и др., 1971).

У магніторозвідці, структурній геології, петрофізиці, тектоніці та інших областях геології і геофізики під магнітною анізотропією зазвичай мається на увазі анізотропія магнітної сприйнятливості, яка задається за допомогою тензора χ . Вона враховується при вирішенні прямої і оберненої задачі магнітометрії для анізотропних середовищ.

Постановка задачі. Виберемо праву прямокутну систему координат x, y, z і розмістимо в ній деяке тривимірне тіло об'ємом W . Нехай x, y, z – координати точок поза межами тіла, в яких обчислюється магнітне поле; ξ, η, ζ – координати точок тіла, які обумовлюють його магнітне поле.

У вибраній системі прямокутних координат розмістимо довільно зрізану вертикальну прямокутну призму, як показано на рис. 3.1.

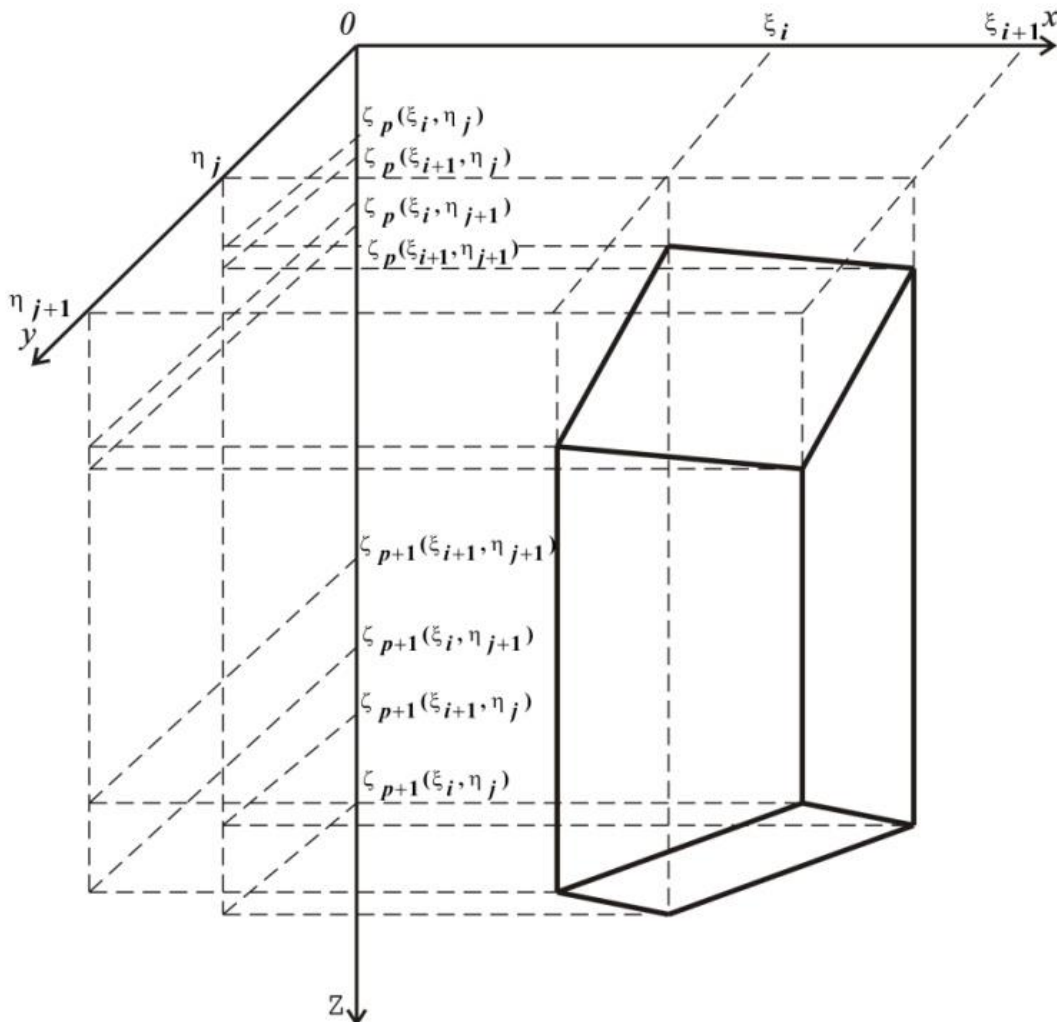


Рис.3.1. Розташування довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми відносно правої системи прямокутних координат.

Використовуючи загальновідоме співвідношення (Идельсон, 1936; Тафеев, Соколов, 1981; Блох, 1993; Булах, Шуман, 1998), запишемо вираз магнітного потенціалу для розглянутого тіла:

$$U(x, y, z) = \iiint_W \left(I(\xi, \eta, \zeta), \text{grad} \frac{1}{r} \right) d\xi d\eta d\zeta. \quad (3.1)$$

В цій формулі $\left(I(\xi, \eta, \zeta), \text{grad} \frac{1}{r} \right)$ – символ скалярного добутку векторів; $r^2 = (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2$ – квадрат відстані між точками (x, y, z) и (ξ, η, ζ) ;

$$I(\xi, \eta, \zeta) = I_x(\xi, \eta, \zeta)i + I_y(\xi, \eta, \zeta)j + I_z(\xi, \eta, \zeta)k \quad (3.2)$$

– вектор інтенсивності намагніченості призми; $I_x(\xi, \eta, \zeta)$, $I_y(\xi, \eta, \zeta)$, $I_z(\xi, \eta, \zeta)$ – його складові;

$$\text{grad} \frac{1}{r} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{r} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{r} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \mathbf{k}. \quad (3.3)$$

Обчислюючи в (3.3) похідні і потім виконуючи в (3.1) скалярне перемноження векторів, перепишемо співвідношення (3.1) наступним чином:

$$U(x, y, z) = \iiint_W \left[I_x(\xi, \eta, \zeta) \frac{\xi - x}{r^3} + I_y(\xi, \eta, \zeta) \frac{\eta - y}{r^3} + I_z(\xi, \eta, \zeta) \frac{\zeta - z}{r^3} \right] d\xi d\eta d\zeta. \quad (3.4)$$

Якщо в виразі (3.4) прийняти, що тіло однорідне, тобто $I_x(\xi, \eta, \zeta) = I_x$, $I_y(\xi, \eta, \zeta) = I_y$ и $I_z(\xi, \eta, \zeta) = I_z$ – сталі, праву частину (3.4) помножити і розділити на $f\sigma$, де f – гравітаційна стала і σ – стала густина, то на підставі (3.4) отримаємо відоме співвідношення Пуассона стосовно до досліджуваних тіл:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{f\sigma} \left[I_x V_x(x, y, z) + I_y V_y(x, y, z) + I_z V_z(x, y, z) \right] \quad (3.5)$$

де $V_x(x, y, z)$, $V_y(x, y, z)$ і $V_z(x, y, z)$ – похідні гравітаційного потенціалу тих же однорідних тіл.

Для верхньої основи призми випишемо координати вершин:

$$\left. \begin{aligned} &(\xi_i, \eta_j, \zeta_p(\xi_i, \eta_j)), \\ &(\xi_i, \eta_{j+1}, \zeta_p(\xi_i, \eta_{j+1})), \\ &(\xi_{i+1}, \eta_{j+1}, \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_{j+1})), \\ &(\xi_{i+1}, \eta_j, \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_j)). \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Якщо в (3.6) індекс p замінити на $(p+1)$, отримаємо запис координат вершин для нижньої основи призми.

Рівняння для верхньої основи призми має вигляд:

$$\zeta_p(\xi, \eta) = \zeta_p(\xi_i, \eta) + \frac{\zeta_p(\xi_{i+1}, \eta) - \zeta_p(\xi_i, \eta)}{\xi_{i+1} - \xi_i} (\xi - \xi_i), \quad (3.7)$$

де

$$\zeta_p(\xi_{i+1}, \eta) = \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_j) + \frac{\zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_{j+1}) - \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_j)}{\eta_{j+1} - \eta_j} (\eta - \eta_j). \quad (3.8)$$

Замінивши в (3.7) та (3.8) індекс p на $(p+1)$, отримаємо рівняння для нижньої основи призми, причому приймаємо, що

$$\zeta_{p+1}(\xi, \eta) \geq \zeta_p(\xi, \eta). \quad (3.9)$$

Співвідношення (3.7) і (3.8), а також рис. 3.1, дають змогу у виразі (3.4) конкретизувати межі інтегрування за ξ, η, ζ , які описують призму. Виконуючи це, а потім диференціюючи переписаний таким чином вираз (3.4) за змінним x, y, z ,

отримуємо формули для складових повного вектора напруженості магнітного поля $T(x,y,z)$, обумовленого призмою:

$$X(x,y,z) = U_x(x,y,z) = \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \int_{\zeta_p}^{\zeta_{p+1}} \left[I_x(\xi,\eta,\zeta) \frac{3(\xi-x)^2 - r^2}{r^5} + 3I_y(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\xi-x)(\eta-y)}{r^5} + 3I_z(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\xi-x)(\zeta-z)}{r^5} \right] d\xi d\eta d\zeta, \quad (3.10)$$

$$Y(x,y,z) = U_y(x,y,z) = \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \int_{\zeta_p}^{\zeta_{p+1}} \left[3I_x(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\xi-x)(\eta-y)}{r^5} + I_y(\xi,\eta,\zeta) \frac{3(\eta-y)^2 - r^2}{r^5} + 3I_z(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\eta-y)(\zeta-z)}{r^5} \right] d\xi d\eta d\zeta, \quad (3.11)$$

$$Z(x,y,z) = U_z(x,y,z) = \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \int_{\zeta_p}^{\zeta_{p+1}} \left[3I_x(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\xi-x)(\zeta-z)}{r^5} + 3I_y(\xi,\eta,\zeta) \frac{(\eta-y)(\zeta-z)}{r^5} + I_z(\xi,\eta,\zeta) \frac{3(\zeta-z)^2 - r^2}{r^5} \right] d\xi d\eta d\zeta. \quad (3.12)$$

Розмістимо чотирикутну зрізану піраміду так, щоб сторони її основ були паралельними горизонтальним осям. Тоді, враховуючи показані на рис. 3.2.

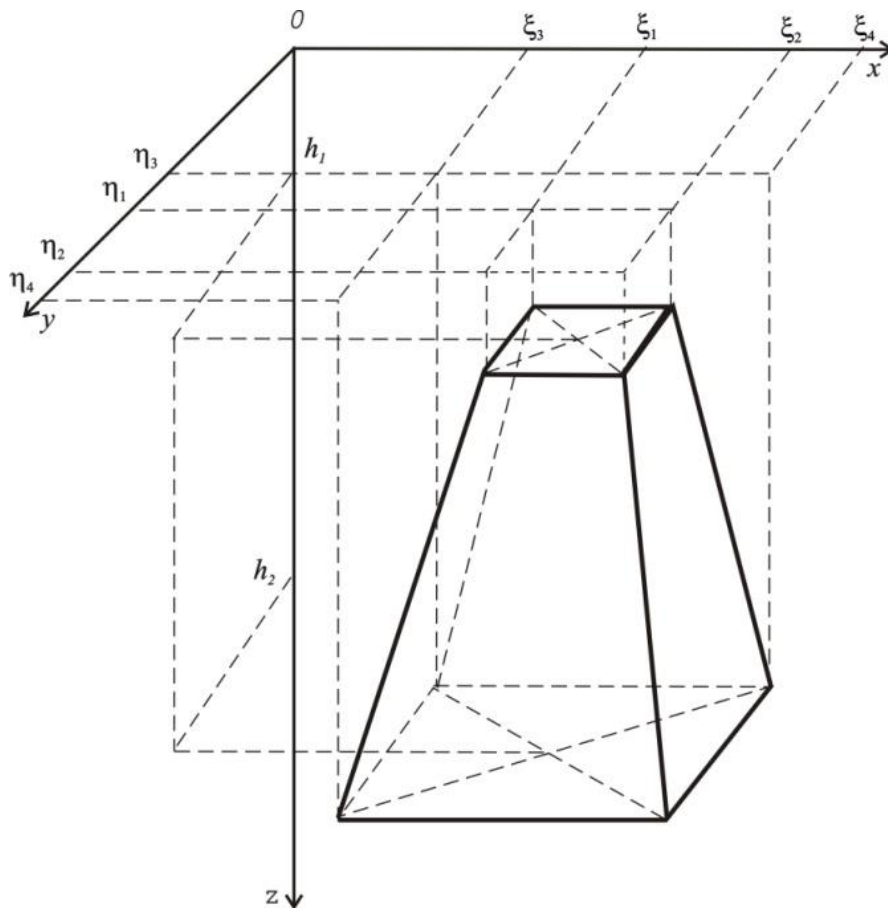


Рис.3.2. Розташування чотирикутної зрізаної піраміди відносно вибраної системи координат.

позначення для горизонтальних і вертикальних координат вершин піраміди, вираз (3.4) для неї переписується наступним чином:

$$U(x, y, z) = \int_{h_1}^{h_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left[I_x(\xi, \eta, \zeta) \frac{\xi - x}{r^3} + I_y(\xi, \eta, \zeta) \frac{\eta - y}{r^3} + I_z(\xi, \eta, \zeta) \frac{\zeta - z}{r^3} \right] d\xi d\eta d\zeta, \quad (3.13)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \xi_H &= (h_1 - \zeta) \frac{\xi_1 - \xi_3}{h_2 - h_1} + \xi_1, \\ \xi_B &= (h_1 - \zeta) \frac{\xi_2 - \xi_4}{h_2 - h_1} + \xi_2, \\ \eta_H &= (h_1 - \zeta) \frac{\eta_1 - \eta_3}{h_2 - h_1} + \eta_1, \\ \eta_B &= (h_1 - \zeta) \frac{\eta_2 - \eta_4}{h_2 - h_1} + \eta_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Диференціювання (3.13) за змінними x, y, z призводить до формул для складових повного вектора напруженості магнітного поля $T(x, y, z)$, обумовленого пірамідою. Їх структура повністю збігається з формулами (3.10)—(3.12), за винятком меж інтегрування, які аналогічні співвідношенню (3.13).

Призми і піраміди зазначених форм зручні, відповідно для апроксимації структурних і рудних геологічних утворень, і успішно використовуються при інтерпретації гравітаційних і геотермічних полів [Старостенко, 1978; Старостенко, Легостаева, 1998; Старостенко и др., 2003]. Маючи в своєму розпорядженні аналогічні рішення для магнітометрії, можна будувати комплексні геофізичні моделі геологічних структур за даними гравіметрії, магнітометрії і геотермії.

Обчислення вектора намагніченості середовища з анізотропною магнітною сприйнятливістю в системі координат заданого тіла. Для обчислення магнітного потенціалу і складових вектора напруженості магнітного поля, обумовленого призмою, тобто для роботи з формулами (3.4) (при відповідних межах інтегрування) і (3.10)—(3.12), а також формулою (3.13) і формулами для піраміди, які аналогічні виразами (3.10)—(3.12), необхідно побудувати алгоритм обчислення вектора намагніченості тіл за даними, що характеризують їхню анізотропну магнітну сприйнятливість. При цьому очевидно, що намагніченість призми і піраміди повинна бути визначена в системі координат ξ, η, ζ , яка використовується для опису розглянутих тіл.

Будемо оперувати двома правими прямокутними системами координат: крім системи ξ, η, ζ , в якій описані тіла і в якій задається намагніченість $I(\xi, \eta, \zeta)$, введемо до розгляду систему ξ', η', ζ' (строго кажучи, вводиться до розгляду система x', y', z' , але оскільки в цій системі мова йде про точки, що належать призмі і піраміді, то для зручності відразу використовуються позначення ξ', η', ζ' , тобто аналогічно тому, як це прийнято для системи x, y, z). Будемо називати її власною системою тензора χ , який характеризує анізотропну магнітну сприйнятливість. У цій системі осі $0\xi', 0\eta', 0\zeta'$ збігаються з головними осями (напрямами) тензора χ (Аківис, Гольдберг, 1969; Мышкис, 1971).

У анізотропному середовищі складові вектора намагніченості $I_x(\xi, \eta, \zeta)$, $I_y(\xi, \eta, \zeta)$ і $I_z(\xi, \eta, \zeta)$ виражаються через тензор сприйнятливості χ і складові вектора

напруженості магнітного поля $H(\xi, \eta, \zeta)$ всередині призми і піраміди в матричній формі наступним чином:

$$\begin{pmatrix} I_x(\xi, \eta, \zeta) \\ I_y(\xi, \eta, \zeta) \\ I_z(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix} = (\chi_{ij}) \begin{pmatrix} H_\xi(\xi, \eta, \zeta) \\ H_\eta(\xi, \eta, \zeta) \\ H_\zeta(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

де компоненти тензора χ_{ij} – елементи матриці:

$$(\chi_{ij}) = \begin{pmatrix} \chi_{\xi\xi}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\xi\eta}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\xi\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \\ \chi_{\eta\xi}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\eta\eta}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\eta\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \\ \chi_{\zeta\xi}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\zeta\eta}(\xi, \eta, \zeta) & \chi_{\zeta\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Припустимо, що розмагнічуюче поле тіл незначне (порівняно з похибкою спостереженого поля) і їм можна знехтувати. Тоді

$$H(\xi, \eta, \zeta) = T_0(\xi, \eta, \zeta), \quad (3.17)$$

де $T_0(\xi, \eta, \zeta)$ – вектор напруженості нормального магнітного поля всередині тіла. Крім того, приймаємо також припущення, що в межах призми і піраміди $T_0(\xi, \eta, \zeta)$ постійне. Отже, з огляду на (3.17), для складових вектора $T_0(\xi, \eta, \zeta)$ будемо розглядати випадок, при якому:

$$\left. \begin{aligned} H_\xi(\xi, \eta, \zeta) &= X_0(\xi, \eta, \zeta) = X_0, \\ H_\eta(\xi, \eta, \zeta) &= Y_0(\xi, \eta, \zeta) = Y_0, \\ H_\zeta(\xi, \eta, \zeta) &= Z_0(\xi, \eta, \zeta) = Z_0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.18)$$

З урахуванням (3.18) формула (3.15) набуває вигляду:

$$\begin{pmatrix} I_x(\xi, \eta, \zeta) \\ I_y(\xi, \eta, \zeta) \\ I_z(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix} = (\chi_{ij}) \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

Відомо (Акивис, Гольдберг, 1969; Вонсовский, 1971), що матриця (3.16) симетрична ($\chi_{ij} = \chi_{ji}$). Завдяки цьому вона має не дев'ять, а шість незалежних компонент. Виразимо їх через головні значення сприйнятливості $\chi_{\xi'}, \chi_{\eta'}, \chi_{\zeta'}$, тобто магнітну сприйнятливість уздовж осей $0\xi', 0\eta', 0\zeta'$ і напрямні косинуси осей $0\xi', 0\eta', 0\zeta'$ щодо системи ξ, η, ζ (Завойский, Крутиховская, 1961; Вонсовский, 1963; Акивис, Гольдберг, 1969). Для цього скористаємося загальною формулою переходу компонент тензора з системи ξ', η', ζ' в систему ξ, η, ζ (Акивис, Гольдберг, 1969; Мышкис, 1971; Зельдович, Мышкис, 1972; Корн, Корн, 1973):

$$\chi_{ij}(\xi, \eta, \zeta) = \alpha_{ik} \alpha_{jl} \chi'_{kl}(\xi', \eta', \zeta'), \quad i, j = \xi, \eta, \zeta; \quad k, l = \xi', \eta', \zeta', \quad (3.20)$$

де $\alpha_{ik} \alpha_{jl}$ – напрямні косинуси осей $0\xi', 0\eta', 0\zeta'$ стосовно осей $0\xi, 0\eta, 0\zeta$. Оскільки система ξ', η', ζ' , відповідно до нашої умови, є власною, то елементи $\chi'_{kl}(\xi', \eta', \zeta') = 0$ при $k \neq l$. Тому загальна формула (3.20) приймає більш простий вигляд:

$$\chi_{ij}(\xi, \eta, \zeta) = \alpha_{ik} \alpha_{jk} \chi'_{kk}(\xi', \eta', \zeta') = \alpha_{ik} \alpha_{jk} \chi_k(\xi', \eta', \zeta'), \quad (3.21)$$

де $\chi'_{kk}(\xi', \eta', \zeta')$ – головні значення тензора магнітної сприйнятливості χ , для яких введено позначення:

$$\chi'_{kk}(\xi', \eta', \zeta') = \chi_k(\xi', \eta', \zeta'), \quad k = \xi', \eta', \zeta'. \quad (3.22)$$

Зокрема, впливає, що $\chi_{ij}(\xi, \eta, \zeta) = \chi_{ji}(\xi, \eta, \zeta)$. З огляду на це, а також прийняте вище допущення, що в межах призми магнітне поле постійне, на підставі (3.16) і (3.19) можемо записати шуканий вираз для складових вектора намагніченості:

$$\begin{pmatrix} I_x(\xi, \eta, \zeta) \\ I_y(\xi, \eta, \zeta) \\ I_z(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_{\xi\xi}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\xi\eta}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\xi\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \\ \chi_{\xi\eta}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\eta\eta}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\eta\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \\ \chi_{\xi\zeta}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\eta\zeta}(\xi, \eta, \zeta)\chi_{\zeta\zeta}(\xi, \eta, \zeta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}. \quad (3.23)$$

Отже, в явному вигляді знайдені співвідношення, які дають змогу обчислити складові вектора намагніченості призми і піраміди за компонентами тензора сприйнятливості χ (вхідними даними, для визначення яких в свою чергу слугують головні значення тензора сприйнятливості (3.22) і кути Ейлера α, β, γ) і складовими намагнічуючого поля T_0 .

Алгоритм розв'язання прямої задачі магнітометрії для призми і піраміди з анізотропною магнітною сприйнятливістю. Підстановка значень складових вектора намагніченості $I_x(\xi, \eta, \zeta), I_y(\xi, \eta, \zeta), I_z(\xi, \eta, \zeta)$ із співвідношення (3.23) в рівності (3.4), (3.10)–(3.12) для призми (і аналогічні їм для піраміди) повністю вичерпує постановку задачі. Інтегрування в (3.4), (3.10)–(3.12) необхідно виконувати чисельно за допомогою кубатурних процесів, що застосовуються при вирішенні задач гравіметрії, геотермії та ін. [Старостенко, Легостаєва, 1998; Старостенко и др., 2003]. При використанні сучасних комп'ютерів це не створює обчислювальних проблем.

Точність вирішення задач (3.4), (3.10)–(3.12) буде залежати, насамперед, від точності обчислення складових вектора намагніченості тіл, тобто точності величин $I_x(\xi, \eta, \zeta), I_y(\xi, \eta, \zeta)$ і $I_z(\xi, \eta, \zeta)$. Очевидно, що побудований алгоритм (3.23) дає наближене значення $I_x(\xi, \eta, \zeta), I_y(\xi, \eta, \zeta)$ і $I_z(\xi, \eta, \zeta)$ у загальному випадку. Це є наслідком двох прийнятих вище припущень.

По-перше, прийнято, що розмагнічуючі поля призми і піраміди незначні і ними можна знехтувати. Це означає, що алгоритм справедливий лише для вивчення слабomagнітних геологічних об'єктів (Блох, 1987, 1993).

По-друге, зроблено припущення, що в межах тіл поле $T_0(\xi, \eta, \zeta)$ постійне. Інакше – приймається, що вплив полів, що виникає в результаті взаємовпливу призм або пірамід, невеликий і їм також можна знехтувати (Блох, 1993).

Рішення прямої задачі магнітометрії для однорідних призми і піраміди. У випадку анізотропного середовища вектор I в загальному випадку відхиляється від вектора H . Наприклад, якщо поле H направлено за віссю ξ , то вектор I крім складової I_x може мати складові I_z і I_y . Саме цим зумовлена поява в рівності (3.15) тензора χ_{jj} . Якщо магнітна сприйнятливість тіла величина постійна, тобто тіло однорідне, то напрямки векторів I і H збігаються, а відтак, при $i \neq j$ компоненти $\chi_{ij} = 0$, а діагональні компоненти $\chi_{ii} = \chi = \text{const}$ є скаляром (див., наприклад, (Акивис, Гольдберг, 1969, стор. 230–231)). З огляду на сказане, на підставі (3.23) можемо записати:

$$\begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \chi \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (3.24)$$

де χ – магнітна сприйнятливість.

Диференціюючи рівність (3.5) за координатами x, y, z і враховуючи (3.24), отримуємо формули для компонент напруженості магнітного поля, обумовлені однорідною довільно зрізаною вертикальною прямокутною призмою або чотирикутною зрізаною пірамідою (в загальному випадку – будь-яке однорідне тіло (Идельсон, 1936; Тафеев, Соколов, 1981; Булах, Шуман, 1998)). Ці формули представимо таким чином:

$$\begin{pmatrix} X(x, y, z) \\ Y(x, y, z) \\ Z(x, y, z) \end{pmatrix} = \frac{1}{f\sigma} \begin{pmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{xy} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{xz} & V_{yz} & V_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix}, \quad (3.25)$$

де $V_{xx}, V_{xy}, V_{xz}, V_{yy}, V_{yz}, V_{zz}$ – другі похідні гравітаційного потенціалу, обумовлені призмою або пірамідою. В співвідношенні (3.25) залежність других похідних від x, y, z не показана для більш простого вигляду виразу. Отримано формули $V_{xx}, V_{xy}, V_{xz}, V_{yy}, V_{yz}, V_{zz}$ для призми і піраміди.

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 четвертому розділі «Пряма стаціонарна задача геотермії» дано рішення задач розподілу температури $T(x, y, z)$ і теплового потоку $q(x, y, z)$, що породжуються стаціонарним джерелом тепла, яким слугує неоднорідна довільно зрізана вертикальна прямокутна призма. Попередньо дано рішення тих же задач для точкової маси і вертикального стержня. Це, по-перше, має самостійний інтерес, а по-друге, повністю прояснює застосований спосіб вирішення основних задач.

Всі рішення записані в правій системі прямокутних координат, в якій вісь z спрямована вертикально вниз. Через (x, y, z) будемо позначати координати точок спостереження, а через (ξ, η, ζ) – координати точок тіла (рис. 3.1). Ідея рішень запозичена з монографії (Кутас и др., 1989). Вперше цю ідею сформульовано в роботах (Кутас, 1965, 1972). Крім того, рішення задач спирається на результати, що містяться в статті [Старостенко, Легостаева, 1998].

У підрозділі 4.1 дано рішення прямої стаціонарної задачі геотермії для точкової маси. Положення точкової маси визначається координатами (ξ, η, ζ) , причому ζ – її глибина (рис. 4.1). Тоді гравітаційний потенціал для точки одиничної маси $dm = d\xi d\eta d\zeta = 1$ з точністю до коефіцієнта, рівного гравітаційній постійній f (тобто штучно приймаємо, що $f = 1$), описується як

$$V(x, y, z) = \frac{1}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2}}. \quad (4.1)$$

Також маємо фіктивну аналогічну точку з глибиною – ζ , яка стосовно площини $z=0$ розташована дзеркально щодо точки з глибиною ζ (таким чином задовольняється нульова гранична умова на площині $z = 0$ для температури $T(x, y, z)$ (Кутас и др., 1989, стор. 59)). Для цієї точки потенціал відображення буде таким:

$$V^{\text{отоб}}(x, y, z) = \frac{1}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (-\zeta - z)^2]^{1/2}} = \frac{1}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{1/2}}, \quad (4.2)$$

де $s^2 = (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2$. (4.3)

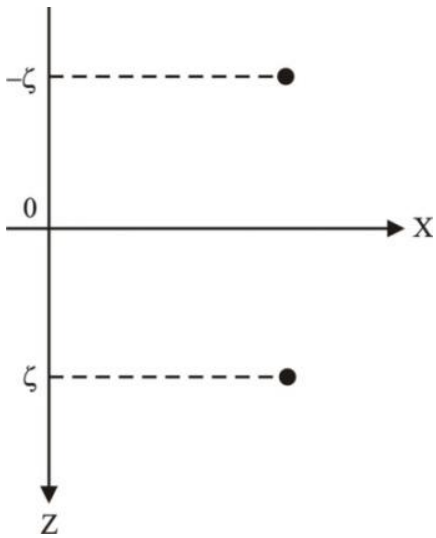


Рис. 4.1. Схема розташування точкової маси і її фіктивного відображення щодо прямокутної системи координат.

Тоді стаціонарна температура $T(x, y, z)$, що генерується точковою масою, у якій Q – густина теплогенерації і λ – коефіцієнт теплопровідності, в точках (x, y, z) однорідного півпростору описується виразом:

$$T(x, y, z) = V(x, y, z) - V^{\text{отоб}}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left\{ \frac{1}{[s^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{1/2}} \right\}. \quad (4.4)$$

Стаціонарний тепловий потік, створюваний точковою масою в однорідному півпросторі, описується формулою, яку одержують шляхом диференціювання співвідношення (4.4) у напрямку z :

$$q(x, y, z) = V_z(x, y, z) - V_z^{\text{отоб}}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi} \left\{ \frac{\zeta - z}{[s^2 + (\zeta - z)^2]^{3/2}} + \frac{\zeta + z}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{3/2}} \right\}, \quad (4.5)$$

де приймається, що коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1$.

У підрозділі 4.2 дано рішення прямої стаціонарної задачі геотермії для вертикального стержня.

Нехай верхній і нижній кінці вертикального стержня розташовані на глибинах ζ_1 і ζ_2 відповідно (рис. 4.2). Щоб отримати формули для розподілу стаціонарних температури і теплового потоку, що генеруються цим вертикальним стержнем, необхідно в правих частинах формул (4.4) і (4.5) виконати інтегрування за ζ в межах від ζ_1 до ζ_2 . Це дає:

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \frac{(\zeta - z) + [s^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2}}{(\zeta + z) + [s^2 + (\zeta + z)^2]^{1/2}} \Bigg|_{\zeta=\zeta_1}^{\zeta_2} \quad (4.6)$$

і

$$q(x, y, z) = -\frac{Q}{4\pi} \left\{ \frac{1}{[s^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2}} + \frac{1}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{1/2}} \right\} \Bigg|_{\zeta=\zeta_1}^{\zeta_2}. \quad (4.7)$$

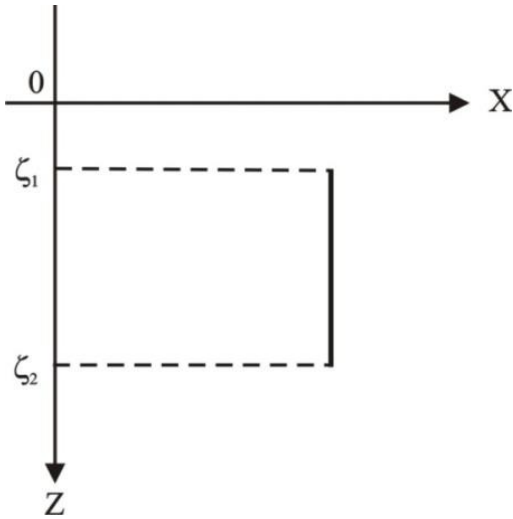


Рис. 4.2. Схема розташування вертикального стержня щодо прямокутної системи координат.

У підрозділі 4.3 дано рішення прямої стаціонарної задачі геотермії для неоднорідної довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми. Поняття «неоднорідність» призми вимагає уточнення, для чого введемо визначення. Нехай коефіцієнт теплопровідності в призмі постійний, тобто $\lambda(\xi, \eta, \zeta) = \lambda$, а густина теплогенерації $Q(\xi, \eta, \zeta)$ відома в усіх восьми вершинах призми і змінюється за одним з двох випадків:

- 1) за лінійним законом уздовж горизонтальних координат осей на верхній і нижній основах, а також уздовж будь-якої вертикальної лінії (випадок 1);
- 2) за лінійним законом уздовж горизонтальних координатних осей на верхній і нижній основах і за експоненціальним законом уздовж будь-якої вертикальної лінії (випадок 2).

При цьому зміни густини теплогенерації в обох випадках такі, що в вершинах призми вона приймає задані значення.

Розташування призми щодо прямокутної системи координат показано на рис.3.1. Для відношення густини теплогенерації до коефіцієнта теплопровідності введемо позначення:

$$\sigma(\xi, \eta, \zeta) = \frac{Q(\xi, \eta, \zeta)}{\lambda} \quad (4.8)$$

і нехай $\zeta_p(\xi, \eta)$ і $\zeta_{p+1}(\xi, \eta)$ – рівняння верхньої і нижньої основ призми відповідно.

Дотримуючись настанов [Старостенко, Легостаева, 1998], запишемо задані координати вершин і значення в них функції $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ для верхньої основи призми (див. рис. 3.1):

$$\left. \begin{aligned} &(\xi_i, \eta_j, \zeta_p(\xi_i, \eta_j), \sigma_p(\xi_i, \eta_j)), \\ &(\xi_i, \eta_{j+1}, \zeta_p(\xi_i, \eta_{j+1}), \sigma_p(\xi_i, \eta_{j+1})), \\ &(\xi_{i+1}, \eta_{j+1}, \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_{j+1}), \sigma_p(\xi_{i+1}, \eta_{j+1})), \\ &(\xi_{i+1}, \eta_j, \zeta_p(\xi_{i+1}, \eta_j), \sigma_p(\xi_{i+1}, \eta_j)). \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Якщо в (4.9) індекс p замінити на $p + 1$, отримуємо запис координат вершин і значень в них функції $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ для нижньої основи призми.

В (4.9) використовується позначення

$$\sigma_p(\xi, \eta) = \sigma(\xi, \eta, \zeta_p(\xi, \eta)). \quad (4.10)$$

Якщо у виразах (4.9) величину $\sigma_p(\xi, \eta, \zeta)$ замінити на Q_p , отримаємо запис координат вершин призми у разі, коли в них задані значення густини теплогенерації.

Рівняння для функцій, які відповідають умовам випадків 1 і 2, відомі [Старостенко, Легостаева, 1998, ф-ли (33) і (24) відповідно]. На їх підставі запишемо необхідні вирази для функцій $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ і $Q(\xi, \eta, \zeta)$.

Аналітичні вирази для функцій σ і Q для випадку 1:

$$\sigma(\xi, \eta, \zeta) = a_1(\xi, \eta) + d_1(\xi, \eta)\zeta, \quad (4.11)$$

$$Q(\xi, \eta, \zeta) = a_2(\xi, \eta) + d_2(\xi, \eta)\zeta, \quad (4.12)$$

де

$$a_1(\xi, \eta) = \sigma_p(\xi, \eta) - d_1(\xi, \eta)\zeta_p(\xi, \eta), \quad (4.13)$$

$$a_2(\xi, \eta) = Q_p(\xi, \eta) - d_2(\xi, \eta)\zeta_p(\xi, \eta). \quad (4.14)$$

У формулах (4.11)–(4.14) можуть використовуватися такі символи [Старостенко, Легостаева, 1998, ф-ли (7), (8)]:

$$\sigma_{p(p+1)}(\xi, \eta) = \sigma_{p(p+1)}(\xi_i, \eta) + \frac{\sigma_{p(p+1)}(\xi_{i+1}, \eta) - \sigma_{p(p+1)}(\xi_i, \eta)}{\xi_{i+1} - \xi_i} (\xi - \xi_i), \quad (4.15)$$

$$d_1(\xi, \eta) = \frac{\sigma_{p+1}(\xi, \eta) - \sigma_p(\xi, \eta)}{\zeta_{p+1}(\xi, \eta) - \zeta_p(\xi, \eta)}, \quad (4.16)$$

де

$$\zeta_{p(p+1)}(\xi, \eta) = \zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta) + \frac{\zeta_{p(p+1)}(\xi_{i+1}, \eta) - \zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta)}{\xi_{i+1} - \xi_i} (\xi - \xi_i). \quad (4.17)$$

Співвідношення (4.15) при індексі p – рівняння функції $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ для верхньої сторони чотирикутної пластини, що вирізується площиною η всередині призми, яка може бути представлена набором таких пластин [Старостенко, Легостаева, 1998]. При індексі $p + 1$ – маємо рівняння для нижньої сторони пластини.

Вираз (4.17) – рівняння для верхньої (при індексі p) і нижньої (при індексі $p + 1$) сторін пластини.

Величини $\sigma_{p(p+1)}(\xi_i, \eta)$, $\zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta)$ та подібні їм, які входять в (4.15), (4.16), визначаються аналогічними лінійними рівняннями. Наприклад:

$$\zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta) = \zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta_j) + \frac{\zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta_{j+1}) - \zeta_{p(p+1)}(\xi_i, \eta_j)}{\eta_{j+1} - \eta_j} (\eta - \eta_j). \quad (4.18)$$

Якщо в співвідношеннях (4.15), (4.16) величини $\sigma_{p(p+1)}$ замінити на $Q_{p(p+1)}$, отримаємо вираз для $d_2(\xi, \eta)$ і, відповідно, для $a_2(\xi, \eta)$.

Аналітичні вирази для функцій σ і Q для випадку 2. Для σ і Q , враховуючи рівняння (24) з [Старостенко, Легостаева, 1998], маємо:

$$\sigma(\xi, \eta, \zeta) = \sigma_1 - \sigma_2(\xi, \eta) \exp[-(\zeta - \zeta_p(\xi, \eta))k_\sigma(\xi, \eta)], \quad (4.19)$$

$$Q(\xi, \eta, \zeta) = Q_1 - Q_2(\xi, \eta) \exp[-(\zeta - \zeta_p(\xi, \eta))k_Q(\xi, \eta)], \quad (4.20)$$

де

$$\sigma_2(\xi, \eta) = \sigma_1 - \sigma_p(\xi, \eta), \quad (4.21)$$

$$k_\sigma(\xi, \eta) = -\frac{1}{\zeta_{p+1}(\xi, \eta) - \zeta_p(\xi, \eta)} \ln \frac{\sigma_1 - \sigma_{p+1}(\xi, \eta)}{\sigma_1 - \sigma_p(\xi, \eta)}, \quad (4.22)$$

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \sigma(\xi, \eta, \zeta) \rightarrow \sigma_1. \quad (4.23)$$

Підставляючи в виразах (4.21)–(4.23) функцію Q замість σ , отримуємо в розгорнутому вигляді співвідношення (4.20).

Рішення стаціонарних задач геотермії для неоднорідної призми. Всю підготовчу роботу для вирішення задач стаціонарного розподілу температури $T(x, y, z)$ і теплового потоку $q(x, y, z)$, що генеруються неоднорідною призмою в однорідному півпросторі, виконано. Саме рішення полягає в обчисленні інтегралів, які записуються на підставі співвідношень (4.4) і (4.5):

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{\xi_i}^{\xi_{j+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \int_{\zeta_p(\xi, \eta)}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)} \sigma(\xi, \eta, \zeta) \left\{ \frac{1}{[s^2 + (\zeta - z)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{1/2}} \right\} d\xi d\eta d\zeta \quad (4.24)$$

і

$$q(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{\xi_i}^{\xi_{j+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \int_{\zeta_p(\xi, \eta)}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)} Q(\xi, \eta, \zeta) \left\{ \frac{\zeta - z}{[s^2 + (\zeta - z)^2]^{3/2}} + \frac{\zeta + z}{[s^2 + (\zeta + z)^2]^{3/2}} \right\} d\xi d\eta d\zeta, \quad (4.25)$$

де $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ і $Q(\xi, \eta, \zeta)$ виражаються за допомогою співвідношень (4.11), (4.12), (4.19) і (4.20).

Очевидно, що йдеться тільки про аналітичне обчислення в (4.24) і (4.25) інтегралів за ζ і подальше чисельне інтегрування отриманого виразу за ξ і η .

Рішення задач при зміні функцій σ і Q відповідно до випадку 1. Для виконання інтегрування в (4.24) за ζ зручно для першого доданка підінтегрального виразу скористатися заміною змінної $\zeta - z = \zeta'$, а для другого – заміною $\zeta + z = \zeta'$. При цьому відповідно до виразів (4.11) і (4.12) будемо мати:

$$\sigma(\xi, \eta, \zeta' \pm z) = [a_1(\xi, \eta) \pm z d_1(\xi, \eta)] + d_1(\xi, \eta) \zeta', \quad (4.26)$$

$$Q(\xi, \eta, \zeta' \pm z) = [a_2(\xi, \eta) \pm z d_2(\xi, \eta)] + d_2(\xi, \eta) \zeta'. \quad (4.27)$$

Враховуючи (4.26) і (4.27), після виконання інтегрування в (4.24) і (4.25) за ζ отримаємо:

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{\xi_i}^{\xi_{j+1}} \int_{\eta_j}^{\eta_{j+1}} \{ [a_1(\xi, \eta) + z d_1(\xi, \eta)] A_1(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)-z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)-z} + d_1(\xi, \eta) B_1(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)-z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)-z} - [a_1(\xi, \eta) - z d_1(\xi, \eta)] A_1(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)+z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)+z} - d_1(\xi, \eta) B_1(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)+z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)+z} \} d\xi d\eta, \quad (4.28)$$

Рішення задач при зміні функцій σ і Q відповідно до випадку 2. Оскільки (як і у випадку 1) при інтегруванні (4.24) за ζ доцільно зробити заміни змінної $\zeta - z = \zeta'$ та $\zeta + z = \zeta'$ (для першого і другого доданків підінтегрального виразу відповідно), то замість (4.19) і (4.20) будемо мати [Старостенко, Легостаєва, 1998, ф-ла (56)]:

$$\begin{aligned} \sigma(\xi, \eta, \zeta' \pm z) &= \sigma_1 - \sigma_2(\xi, \eta) \exp[-(\zeta' + t(\xi, \eta))k_\sigma(\xi, \eta)] = \\ &= \sigma_1 - \sigma_2(\xi, \eta) \sum_{n=0}^4 b_n [(\zeta' + t(\xi, \eta))k_\sigma(\xi, \eta)]^n, \end{aligned} \quad (4.35)$$

де

$$t(\xi, \eta) = \pm z - \zeta_p(\xi, \eta). \quad (4.36)$$

Коефіцієнти $b_n, n = \overline{0,4}$, наведено в [Старостенко, Легостаева, 1998, ф-ла (58)], а точність апроксимації використаного в (4.35) багаточлена оцінюється нерівністю $|\xi| \leq 3 \cdot 10^{-5}$. Цього цілком достатньо для задач геофізики.

Аналогічний вираз отримаємо на підставі (4.20), тобто для функції Q , якщо в (4.35) величину σ замінити на Q .

В (4.35) розгорнемо суму і впорядкуємо результат. Це дасть змогу записати:

$$\sigma(\xi, \eta, \zeta' \pm z) = \sum_{i=0}^4 C_{i\sigma}(\xi, \eta, \pm z) \zeta'^i, \quad (4.37)$$

де

$$C_{0\sigma}(\xi, \eta, \pm z) = \left\{ \sigma_1 - \sigma_2(\xi, \eta) \sum_{n=0}^4 b_n [t(\xi, \eta, \pm z) k_\sigma(\xi, \eta)]^n \right\}, \quad (4.38)$$

$$C_{1\sigma}(\xi, \eta, \pm z) = -\sigma_2(\xi, \eta) \sum_{n=1}^4 n b_n t^{n-1}(\xi, \eta, \pm z) k_\sigma^n(\xi, \eta), \quad (4.39)$$

$$C_{2\sigma}(\xi, \eta, \pm z) = -\sigma_2(\xi, \eta) \left[b_2 k_\sigma^2(\xi, \eta) + \sum_{n=3}^4 3(n-2) b_n t^{n-2}(\xi, \eta, \pm z) k_\sigma^n(\xi, \eta) \right], \quad (4.40)$$

$$C_{3\sigma}(\xi, \eta, \pm z) = -\sigma_2(\xi, \eta) \sum_{n=3}^4 b_n (4 t(\xi, \eta, \pm z))^{n-3} k_\sigma^n(\xi, \eta), \quad (4.41)$$

$$C_{4\sigma}(\xi, \eta, \pm z) = -\sigma_2(\xi, \eta) b_4 k_\sigma^4(\xi, \eta). \quad (4.42)$$

Аналогічно (4.37) будемо мати:

$$Q(\xi, \eta, \zeta' \pm z) = \sum_{i=0}^4 C_{iQ}(\xi, \eta, \pm z) \zeta'^i. \quad (4.43)$$

В цьому випадку у виразах (4.38)–(4.42) параметр σ замінюється параметром Q , тобто замість $k_\sigma(\xi, \eta)$ маємо $k_Q(\xi, \eta)$ і т.д.

Використання розкладань (4.37) і (4.43) дає змогу в співвідношеннях (4.24) і (4.25) виконати інтегрування за ζ після заміни змінної $\zeta - z = \zeta'$ для перших підінтегральних виразів і $\zeta + z = \zeta'$ – для інших. Унаслідок обчислення табличних інтегралів [Двайт, 1966] для температури маємо:

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \int_{\eta_i}^{\eta_{i+1}} \left[\sum_{i=0}^4 C_{i\sigma}(\xi, \eta, z) D_{i\sigma}(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)-z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)-z} - \sum_{i=0}^4 C_{i\sigma}(\xi, \eta, -z) D_{i\sigma}(\xi, \eta, \zeta') \Big|_{\zeta'=\zeta_p(\xi, \eta)+z}^{\zeta_{p+1}(\xi, \eta)+z} \right] d\xi d\eta, \quad (4.44)$$

Для реалізації обчислень за шуканими рішеннями задач необхідно звертатися до техніки обчислення подвійних інтегралів за допомогою кубатурного процесу. Ця техніка добре відпрацьована [Легостаева, 1999а, б]; (Старостенко, Манукян, 1986, 1988).

У підрозділі 4.4 дано узагальнення стаціонарної задачі геотермії Релея–Тихонова для горизонтального нескінченного плоскопаралельного шару [Старостенко и др., 2006]. На початку ХХ століття майбутній лауреат Нобелівської премії Е. Резерфорд вперше виявив ефект виділення тепла в гірських породах, що містять радій. За його оцінками радію в Землі досить, щоб пояснити спостережуваний у її поверхні температурний градієнт (Strutt, 1906; Джеффрис, 1960). Слідом за Е. Резерфордом це ж питання на значно ширшому

експериментальному матеріалі вивчив Дж. Стрютт ¹ (Strutt, 1906). Він визначив вміст радію в багатьох вулканічних породах, у невеликій кількості осадових порід, а також у деяких метеоритах. Відповідно було встановлено величину радіоактивного випромінювання досліджуваних зразків. У результаті Дж. Стрютт прийшов, зокрема, до наступних важливих висновків: 1) радій легко виявляється у всіх вулканічних породах; граніти зазвичай містять радію більше, ніж основні породи; 2) глибина залягання земної кори не може перевищувати 45 миль, тому що в іншому випадку тепловий потік був би істотно більше спостережуваного; 3) надра Землі повинні складатися з абсолютно іншого (не радіоактивного) матеріалу (Strutt, 1906).

Для обчислення розподілу температури в земній корі, зумовленої наявністю радію в її породах, Дж. Стрютт вирішує стаціонарну задачу геотермії для однорідного нескінченного горизонтального плоскопаралельного шару, верхня грань якого збігається з землею поверхнею, причому температура на ній приймає нульове значення (Strutt, 1906). Таким шаром Дж. Стрютт в першому наближенні апроксимує земну кору (рис. 4.3), а розгляд стаціонарної задачі фізично виправданий, тому що на сьогодні відомо, що найбільш довгоживучий ізотоп радію має період напіврозпаду більше 1600 років.

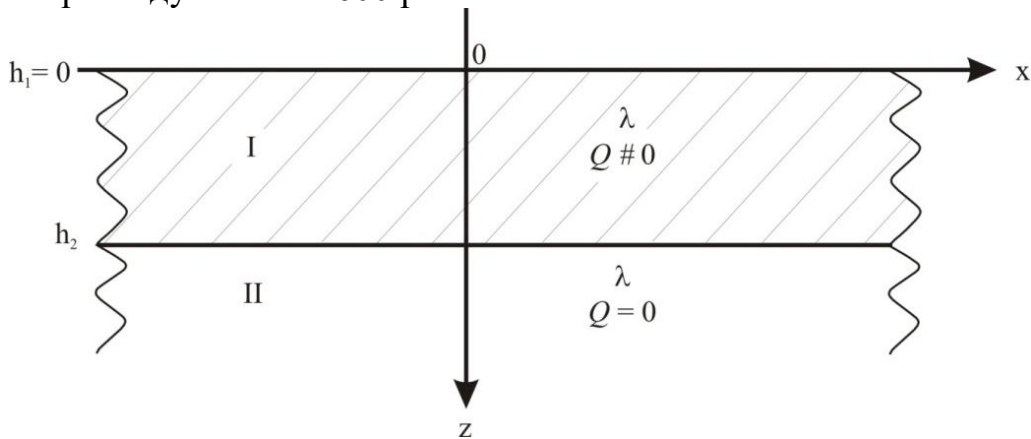


Рис. 4.3. Розташування нескінченного горизонтального плоскопаралельного шару щодо прямокутної системи координат в задачі Релея–Тихонова; h_1 і h_2 – глибини залягання верхньої та нижньої граней I шару відповідно; λ – коефіцієнт теплопровідності шарів; Q – густина теплогенерації в I шарі. Нижче I шару знаходяться породи, що йдуть на нескінченність II шару з тим же λ , але не містять джерел теплогенерації ($Q = 0$).

А.М.Тихонов в своїй відомій праці (Тихонов, 1937) цитує рішення Дж. Стрютта, приводить рішення задач для кількох шарів, для випадку їх неоднорідності, з урахуванням кривизни земної кори та ін. Згодом А.М.Тихонов записує рішення Дж. Стрютта, уточнюючи математичну постановку задачі (Тихонов, Самарский, 1966).

Для сукупності горизонтальних шарів відомі рішення стаціонарних задач геотермії в різних постановках (Тихонов, 1937; Джеффрис, 1960; Череменский,

¹ З 1873 р. Дж.Стрютт – лорд Дж.Релей (Rayleigh); Нобелівська премія 1904 р.

1972; Артюшков, 1933). Це дає змогу в одновимірному наближенні вирішувати багато актуальних завдань геофізики, тектонофізики, геології (Джеффрис, 1960; Любимова, 1968; Череменский, 1972; Жарков, 1983; Лялько, 1985; Кутас и др., 1989; Артюшков, 1993).

Для досягнення мети буде корисним рішення узагальненої задачі Релея–Тихонова, сформульованої для моделі, зображеної на рис. 4.4. Фізичний сенс задачі наступний: у нижньому півпросторі задані чотири однорідних нескінченних горизонтальних шари; у шарах II і III з коефіцієнтами питомої теплопровідності λ_2 і λ_3 знаходяться джерела теплоти з густиною теплогенерації $Q_2 \neq 0$ і $Q_3 \neq 0$. Потрібно визначити розподіл температури і теплового потоку у всіх чотирьох шарах, якщо: на поверхні шару I, що збігається з земною поверхнею, температура дорівнює нулю; в

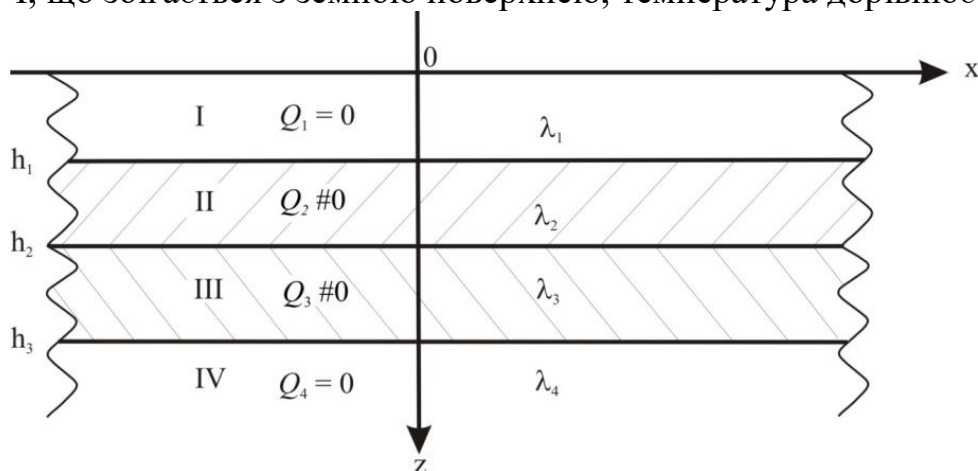


Рис.4.4. Модель узагальненої задачі Релея–Тихонова для чотирьох шарів; I, II, III-номери кінцевих по потужності шарів; IV-йде на нескінченну глибину четвертий шар, породи якого підстеляють третій шар; $h_i, i = \overline{1,3}$, - глибини до нижніх граней I, II і III шарів відповідно; $\lambda_i, Q_i = \overline{1,4}$, - коефіцієнти теплопровідності і густини теплогенерації всіх чотирьох шарів.

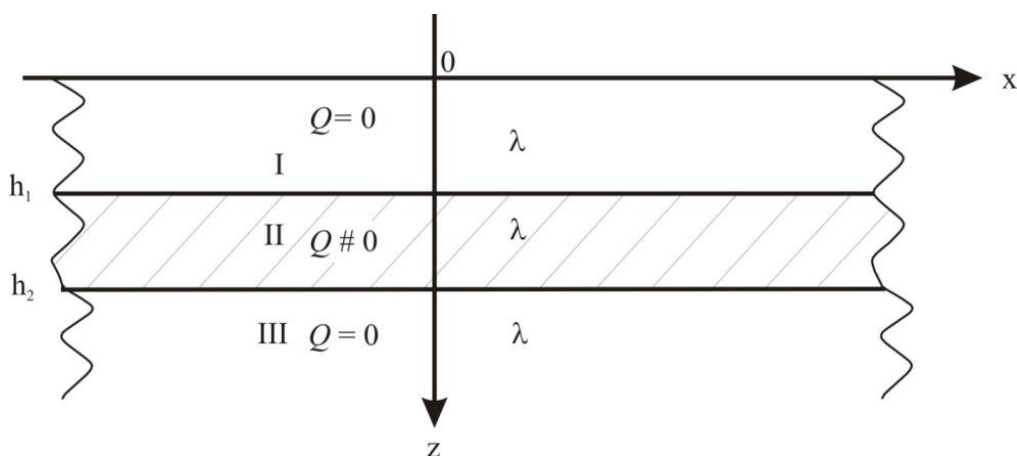


Рис. 4.5. Модель узагальненої задачі Релея–Тихонова для трьох шарів; h_1 і h_2 - глибини до нижніх граней I і II шарів відповідно; джерело теплогенерації $Q \neq 0$ містить тільки II шар; λ - коефіцієнт теплопровідності шарів; III шар йде з глибиною на нескінченність.

шарах I та IV джерела теплогенерації відсутні, тобто $Q_1 = Q_4 = 0$, але відомі їхні коефіцієнти теплопровідності λ_1 і λ_4 .

Дана строга математична постановка узагальненої задачі Релея–Тихонова і знайдено її рішення. Крім того, для шару I наведено ще два незалежних рішення, які визначають в цьому шарі розподіл температури і теплового потоку, що генеруються шаром II в моделі на рис. 4.5.

Математична постановка і рішення узагальненої задачі Релея–Тихонова. Виберемо праву прямокутну систему координат (x, y, z) , вісь z якої спрямована вертикально вниз, розташування осі x показано на рис. 4.3, 4.4 і 4.5, а вісь y направлена в сторону читача. Для **однорідного середовища** випишемо рівняння теплопровідності, яке знадобиться в подальшому (Джеффрис, 1960; Тихонов, Самарский, 1966):

$$\sigma e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + Q, \quad (4.45)$$

або в іншому записі:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T + \frac{Q}{\sigma e}, \quad (4.46)$$

де t — час; $T = T(x, y, z, t)$ — температура; $Q = Q(x, y, z, t)$ — густина теплогенерації; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа; σ — щільність; e — питома теплоємність; λ — коефіцієнт питомої теплопровідності; $\kappa = \frac{\lambda}{\sigma e}$ — коефіцієнт температуропровідності.

Прийmemo, що зміна температури і теплового потоку в шарах є функція тільки глибини z , тобто розглядаємо одновимірну задачу. Враховуючи це, а також те, що задача стаціонарна, тобто густина теплогенерації — величина постійна і температура $T(z)$ від часу t не залежить, перепишемо рівняння (4.45) відповідним чином:

$$\frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} = -\frac{Q}{\lambda}. \quad (4.47)$$

Рівняння (4.47) дозволяє виписати **систему рівнянь для всіх чотирьох шарів моделі рис. 4.4:**

$$\frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} = 0, \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial^2 T_2(z)}{\partial z^2} = -\frac{Q_2}{\lambda_2}, \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial^2 T_3(z)}{\partial z^2} = -\frac{Q_3}{\lambda_3}, \quad h_2 \leq z \leq h_3, \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial^2 T_4(z)}{\partial z^2} = 0, \quad h_3 \leq z < \infty, \quad (4.51)$$

де $T_i(z)$, $i = \overline{1,4}$ — температура в I, II, III, IV шарах відповідно; джерела теплоти в шарах I і IV відсутні, тобто $Q_1 = Q_4 = 0$; температура $T(z)$ на поверхні шару I, тобто при $z = 0$, звертається в нуль.

Граничні умови, що доповнюють опис фізики процесу, для системи рівнянь (4.48)–(4.51) наступні:

$$T_1(z)|_{z=0} = 0, \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial T_4(z)}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad (4.53)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(z)}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(z)}{\partial z} \Big|_{z=h_i}, \quad (4.54)$$

$$T_i(z) \Big|_{z=h_i} = T_{i+1}(z) \Big|_{z=h_i}, \quad \text{де } i = \overline{1, 3}. \quad (4.55)$$

Співвідношення (4.48)–(4.55) вичерпують постановку узагальненої (або повної) задачі Релея–Тихонова для шарів моделі рис. 4.4.

Очевидно, що **загальні рішення рівнянь** (4.48)–(4.51) для шарів I – IV будуть наступними:

$$T_1(z) = az + b, \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.56)$$

$$T_2(z) = \frac{Q_2}{\lambda_2} \left(c_2 z - \frac{z^2}{2} \right) + d_2, \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.57)$$

$$T_3(z) = \frac{Q_3}{\lambda_3} \left(c_3 z - \frac{z^2}{2} \right) + d_3, \quad h_2 \leq z \leq h_3, \quad (4.58)$$

$$T_4(z) = fz + g, \quad h_3 \leq z < \infty. \quad (4.59)$$

Таким чином, рішення задачі зведено до визначення постійних величин $a, b, c_2, d_2, c_3, d_3, f$ і g на підставі граничних умов (4.52)–(4.55).

Значення всіх невідомих в загальних рішеннях (4.56)–(4.59):

$$c_3 = h_3, \quad (4.60)$$

$$c_2 = \frac{Q_3}{Q_2} (h_3 - h_2) + h_2, \quad (4.61)$$

$$a = \frac{1}{\lambda_1} [Q_3(h_3 - h_2) + Q_2(h_2 - h_1)], \quad (4.62)$$

$$d_2 = \frac{h_1}{\lambda_1} [Q_3(h_3 - h_2) + Q_2(h_2 - h_1)] - \frac{h_1}{\lambda_2} \left[Q_3(h_3 - h_2) + Q_2 \left(h_2 - \frac{h_1}{2} \right) \right], \quad (4.63)$$

$$d_3 = \frac{h_2}{\lambda_2} \left[Q_3(h_3 - h_2) + \frac{Q_2 h_2}{2} \right] + d_2 - \frac{Q_3 h_2}{\lambda_3} \left(h_3 - \frac{h_2}{2} \right), \quad (4.64)$$

$$g = \frac{Q_3 h_3^2}{2\lambda_3} + d_3. \quad (4.65)$$

Підставляючи в співвідношення (4.56)–(4.59) значення знайдених величин $a, b, c_2, d_2, c_3, d_3, f, g$, отримуємо шукане **рішення узагальненої задачі Релея–Тихонова** (4.48)–(4.51) для моделі, що складається з **чотирьох шарів** (рис. 4.4):

$$T_1(z) = \frac{z}{\lambda_1} [Q_3(h_3 - h_2) + Q_2(h_2 - h_1)], \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.66)$$

$$T_2(z) = \frac{Q_2}{\lambda_2} \left\{ \left[\frac{Q_3}{Q_2} (h_3 - h_2) + h_2 \right] z - \frac{z^2}{2} \right\} + d_2, \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.67)$$

$$T_3(z) = \frac{Q_3}{\lambda_3} \left(h_3 z - \frac{z^2}{2} \right) + d_3, \quad h_2 \leq z \leq h_3, \quad (4.68)$$

$$T_4(z) = \frac{Q_3 h_3^2}{2\lambda_3} + d_3, \quad h_3 \leq z \leq \infty. \quad (4.69)$$

На підставі (4.66)–(4.69) запишемо розв’язок задачі для випадку одного, другого, активного шару, а саме: приймемо, що в моделі рис. 4.4 глибина $h_3 = h_2$, тобто третій шар відсутній, отже переходимо до **тришарової моделі (рис. 4.5)**. Тоді $Q_3 = Q_2 = Q$ і нехай $\lambda_i = \lambda$, $i = 1, 4$. Підставляючи ці значення для параметрів задачі в співвідношення (4.66)–(4.69), попередньо зауважуючи, що в даному випадку

$$T_3(z) \Big|_{z=h_3=h_2} = T_2(z) \Big|_{h_3=h_2}, \quad (4.70)$$

отримаємо:

$$T_1(z) = \frac{Q}{\lambda} (h_2 - h_1) z, \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.71)$$

$$T_2(z) = \frac{Q}{\lambda} \left(h_2 z - \frac{z^2}{2} - \frac{h_1^2}{2} \right), \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.72)$$

$$T_3(z) = \frac{Q}{2\lambda} (h_2^2 - h_1^2), \quad h_2 \leq z < \infty. \quad (4.73)$$

Перейдемо тепер від рішення (4.71)–(4.73) до рішення задачі для **двошарової моделі (рис. 4.3)**, де активний шар – приповерхневий. Приймаючи для цього в (4.71)–(4.73), що $h_1 = 0$, маємо:

$$T(z) = \begin{cases} \frac{Q}{\lambda} \left(H z - \frac{z^2}{2} \right) & 0 \leq z \leq H, \\ \frac{QH^2}{2\lambda} & H \leq z \leq \infty, \end{cases} \quad (4.74)$$

де $H = h_2$ – потужність першого шару рис. 4.3.

Отже, для стаціонарної задачі геотермії для приповерхневого нескінченного горизонтального шару прийшли до рішення, яке вперше отримав Дж. Релей (Strutt, 1906), а в подальшому використав, дав більш строгу математичну постановку задачі і узагальнив її для різних випадків А.М. Тихонов (Тихонов, 1937; Тихонов, Самарский, 1966). Зауважимо, що співвідношення (4.74) відтворюють рішення задачі в записі А.М.Тихонова (Тихонов, 1937; Тихонов, Самарский, 1966).

Як відомо (Тихонов, 1937; Тихонов, Самарский, 1966) **тепловий потік** визначається наступним чином:

$$q(z) = \lambda \frac{\partial T(z)}{\partial z}. \quad (4.75)$$

Використовуючи рівність (4.75), легко записати вирази теплового потоку для температур (4.66)–(4.68), (4.71), (4.72), (4.74).

Для чотиришарової моделі (рис. 4.5) будемо мати:

$$q_1 = [Q_3(h_3 - h_2) + Q_2(h_2 - h_1)], \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.76)$$

$$q_2(z) = [Q_3(h_3 - h_2) + Q_2(h_2 - z)], \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.77)$$

$$q_3(z) = Q_3(h_3 - z), \quad h_2 \leq z \leq h_3, \quad (4.78)$$

для тришарової моделі (рис. 4.6):

$$q_1 = Q(h_2 - h_1), \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad (4.79)$$

$$q_2(z) = Q(h_2 - z), \quad h_1 \leq z \leq h_2, \quad (4.80)$$

для двошарової моделі (рис. 4.3):

$$q(z) = Q(H - z), \quad 0 \leq z \leq H. \quad (4.81)$$

У всіх випадках нижче активного шару тепловий потік дорівнює нулю.

Для розрахунку потужності радіоактивного шару, розташованого біля поверхні Землі, А.М.Тихонов використовував формулу (4.81) при $z = 0$.

Значення теплового потоку, що визначається формулами (4.76)–(4.81), повністю вичерпують рішення сформульованої узагальненої задачі геотермії Релея–Тихонова. Звернемо також увагу на той факт, що в поверхневому шарі, що не містить джерел теплоти, тепловий потік – величина постійна (відсутня очікувана залежність від глибини z).

У п'ятому розділі «Комплекс «ПЕРЕГЛЯД» та програма UnionMaps» описано основні принципи роботи комплексу «ПЕРЕГЛЯД» і програми UnionMaps та показано, що спільно з технологічними комплексами вирішення різних геофізичних завдань дають змогу виконувати інтерпретацію геофізичних даних за допомогою методу підбору. Використання створених програм буде тим ефективніше, чим досконаліші комплекси рішення прямих (або зворотних) задач геофізики (гравіметрії, магнітометрії, геотермії).

Програма візуалізації функції трьох змінних «ПЕРЕГЛЯД» (рис. 5.1) призначена для комфортного спостереження користувачем геофізичних тривимірних моделей на екрані персонального комп'ютера. Областю застосування програми є автоматизація наукових досліджень, зокрема, полегшення процесу інтерактивної кількісної інтерпретації геофізичних даних. Зазвичай при побудові геофізичних моделей (густинних, магнітних та ін.) зручно розміщувати їх в межах паралелепіпеда, що складається із сукупності довільно зрізаних прямокутних призм апроксимуючих геологічні шари.

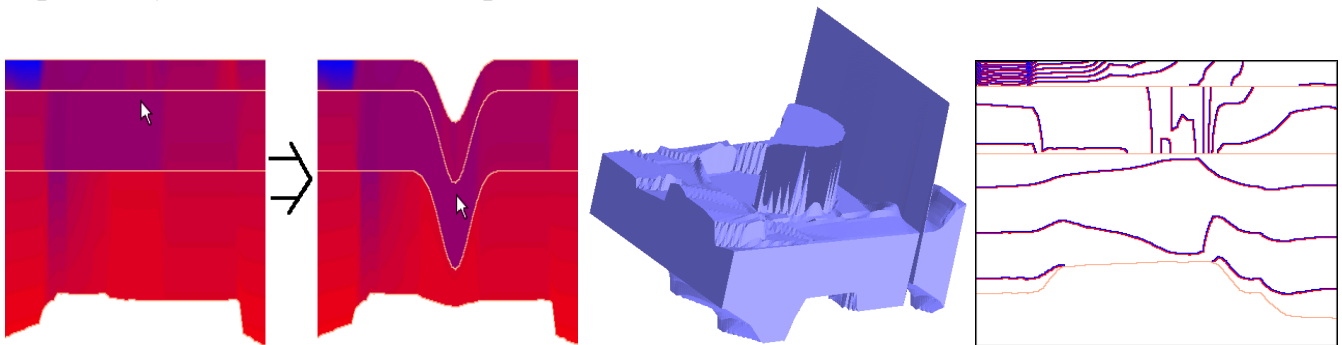


Рис. 5.1. Приклад роботи програми «ПЕРЕГЛЯД».

Програма UnionMaps призначена для автоматизації виконання операції об'єднання двох і більше карт, представлених у вигляді файлів результату оцифрування зображень геофізичних об'єктів.

У шостому розділі «Система автоматизованої інтерпретації даних потенціальних полів (GMT–Auto)» дано детальний опис програм для нової автоматизованої системи 3D інтерпретації гравітаційного, магнітного і теплового полів (GMT–Auto), що дає змогу за заданими полями будувати тривимірні моделі з безперервним розподілом в них фізичних параметрів. Це дозволяє проаналізувати поля детальніше і повніше, оскільки наближення розрахункового поля до модельного значною мірою залежить від ступеня апроксимації середовища в моделі.



Рис. 6.1. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму “3–Д моделювання потенціальних полів”.

Основний принцип, реалізований при створенні комплексу програм, всі операції якого виконуються в інтерактивному режимі, полягає в тому, що на вхід подаються у вигляді карт вихідні дані (рельєф покрівлі і підосви пласта, розподіл фізичних параметрів на них). Результатом роботи комплексу є обчислені ефекти геофізичних полів, а також інформація про фізичні властивості середовища в цифровому або графічному виглядах. Ці розробки є подальшим розвитком ідей і методів, які почали створюватися вітчизняними і зарубіжними геофізиками при впровадженні ЕОМ (комп'ютерів) в геофізичну практику.

Автоматизована система GMT–Auto складається з трьох основних блоків:

1) автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт і побудова їхніх цифрових моделей, які є вхідними даними для розв'язання прямої задачі;

2) розв'язання прямої задачі гравіметрії, магнітометрії і геотермії для тривимірних неоднорідних пластів, які апроксимуються сукупністю неоднорідних вертикальних призм з довільно розташованими верхньою і нижньою основами;

3) представлення результатів розв'язання прямих задач у графічному вигляді.

Отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму “3–Д моделювання потенціальних полів” (рис. 6.1). Усе програмне забезпечення системи написано на мові програмування C ++ і працює в операційному середовищі Windows XP. Обчислювальний комплекс має сучасний інтерфейс, є легким і зручним у використанні.

Сьомий розділ «Приклади побудови тривимірних геофізичних моделей» присвячено прикладам застосування системи для вивчення глибинної будови реальних геологічних об'єктів.

У підрозділі 7.1 представлена тривимірна модель літосфери Українського щита, де виявлено особливості глибинної будови різних мегаблоків земної кори на Українському щиті. Показано, що завершальним етапом створення тривимірної гравітаційної моделі є отримання розподілу густини в повному об'ємі земної кори, що дає можливість побудувати схеми потужностей будь-яких шарів у її складі із заданими інтервалами зміни густини. За таким принципом були побудовані схеми потужностей умовних «гранітного», «діоритового» і «базальтового» шарів, для яких були прийняті відповідні значення густини.

Робота по інтерпретації спостережених величин на Українському щиті виконувалася в інтерактивному режимі, тобто за участю геофізика, який користувався відповідними вихідними матеріалами, а також уявленнями про геологічну будову щита. Вказані етапи моделювання отримали аналітичні рішення та реалізовані у програмних комплексах [Старостенко и др., 2015a]. Результати теоретичних та методичних розробок надруковані в журналах як України, так і за її межами [Старостенко и др., 2006, 2015б, 2017, 2018; Макаренко та ін., 2021]. За допомогою розробленої методики можливий огляд тривимірної моделі з довільної точки, що вибирається інтерпретатором.

У підрозділі 7.2 подана тривимірна модель літосфери шельфу, континентального схилу й глибоководної западини Чорного мор. Акваторія Чорного моря є найперспективнішою нафтогазоносною провінцією України. Ступінь їх освоєння дуже низький – біля 4%. Прогнозування нових перспективних нафтогазових площ в українському секторі Чорного моря потребує розширення інформаційної бази інтерпретації шляхом комплектування методів ГСЗ, магнітометрії, гравіметрії та термометрії.

Для підготовки основи тривимірного гравітаційного моделювання літосфери шельфу, континентального схилу й глибоководної западини Чорного моря підготовлено цифрові каталоги аномалій в редукції у вільному повітрі, рельєфу дна, покрівель відкладів майкопу, еоцену, поверхні Мохоровичича. Всі дані отримано за сіткою 5,0×5,0 км. Матриці кожного параметру одержано в 16855 точках.

Обчислення гравітаційного ефекту проведено за допомогою програмного комплексу автоматичного вводу в комп'ютер геолого-геофізичних карт і представлення їх у цифровій формі, візуалізації та інтерактивній корекції тривимірних геофізичних моделей на екрані монітора [Старостенко и др., 2015]. Це суттєво збільшує роздільну здатність та інтерпретаційні можливості тривимірного геофізичного моделювання. Невід'ємними логічно узгодженими елементами будь-

якого регіонального моделювання є формування відносної густини геологічних шарів і вибір функції приведення розрахункового поля. Оскільки ця проблема найобгрунтованіша в публікації [Starostenko et al., 2004], відповідно була використана методологія цих авторів. Її принципова перевага перед тими, які застосовуються в моделюванні регіональних структур, полягає в тому, що лише вона дає змогу кількісно оцінювати регіональні й локальні відмінності між спостереженим і модельним полем на величезних площах, шляхом визначення гравітаційного ефекту в єдиній референтній системі. Згідно з цим підходом, аномальні густини формуються відносно густини верхньої мантії ($3,32 \text{ г/см}^3$) на поверхні Мохоровичича (41 км) стабільної докембрійської платформи.

Дослідження зміни густини з глибиною здійснено за даними вимірювань густини зразків з 17 свердловин на північно-західному шельфі і з 3 – у Східно-Чорноморській западині. Максимальна глибина відбору морських зразків складає 3,5 км. Додатково було залучено дані, отримані лабораторними вимірами густини зразків з відслонень і свердловин на прилягаючому суходолі. Узагальнення всієї інформації представлено у графічному вигляді, де кожна крива $f = \sigma(H)$ відповідає аналітичному виразу для лінійної й експоненціальної зміни густини з глибиною.

У підрозділі 7.3 описані карти залишкового гравітаційного поля Ліптовської котловини (Північна Словаччина). Ліптовська котловина знаходиться в північній частині Словаччини між Татрами на півночі і Низькими Татрами на півдні. Простягається у широтному напрямку, довжина 50 км, ширина 15 км. У котловині знайдено цілу низку мінеральних і термальних джерел. Зростаючий інтерес до використання геотермальних вод для отримання енергії, а також зв'язок термальних джерел з мезозойськими породами дотретинного фундаменту басейну, роблять цей регіон привабливим для вивчення.

Створення карти залишкового гравітаційного поля з великим ступенем точності саме для Ліптовської котловини було головною метою роботи [Szalaiová et al., 2008]. Це обумовлено тим, що Ліптовська котловина є однією з найвивченіших структур Західних Карпат. При розробці 3D гравітаційної моделі осадової товщі басейну були використані всі наявні геофізичні та геологічні дані. Нова карта залишкового гравітаційного поля Ліптовської котловини на сьогодні є найточнішою. Ці високоякісні гравітаційні карти доцільно використовувати у випадках, коли осадовий басейн і структури фундаменту не показують значних відмінностей в полі сили тяжіння. Розрізнити гравітаційні аномалії, які характеризуються маленькими та близькими амплітудами (інтенсивностями), можливо тільки за допомогою таких високоякісних карт. Вони дають змогу досягти мети при вивченні аномальних густинних зон під басейнами з потужним осадовим чохлам, попри природну неоднозначність геофізичної інтерпретації. Отримані таким чином гравітаційні аномалії, що відображають чутливі, але суттєві зміни структури гравітаційного поля, дозволили визначити особливості будови і літології дотретинного фундаменту, а також коливання товщини тектонічних одиниць фундаменту (рис. 7.1).

3D гравітаційний ефект осадової товщі басейну Ліптовської котловини було розраховано за допомогою системи GMT-Auto. Для цього було застосовано новий

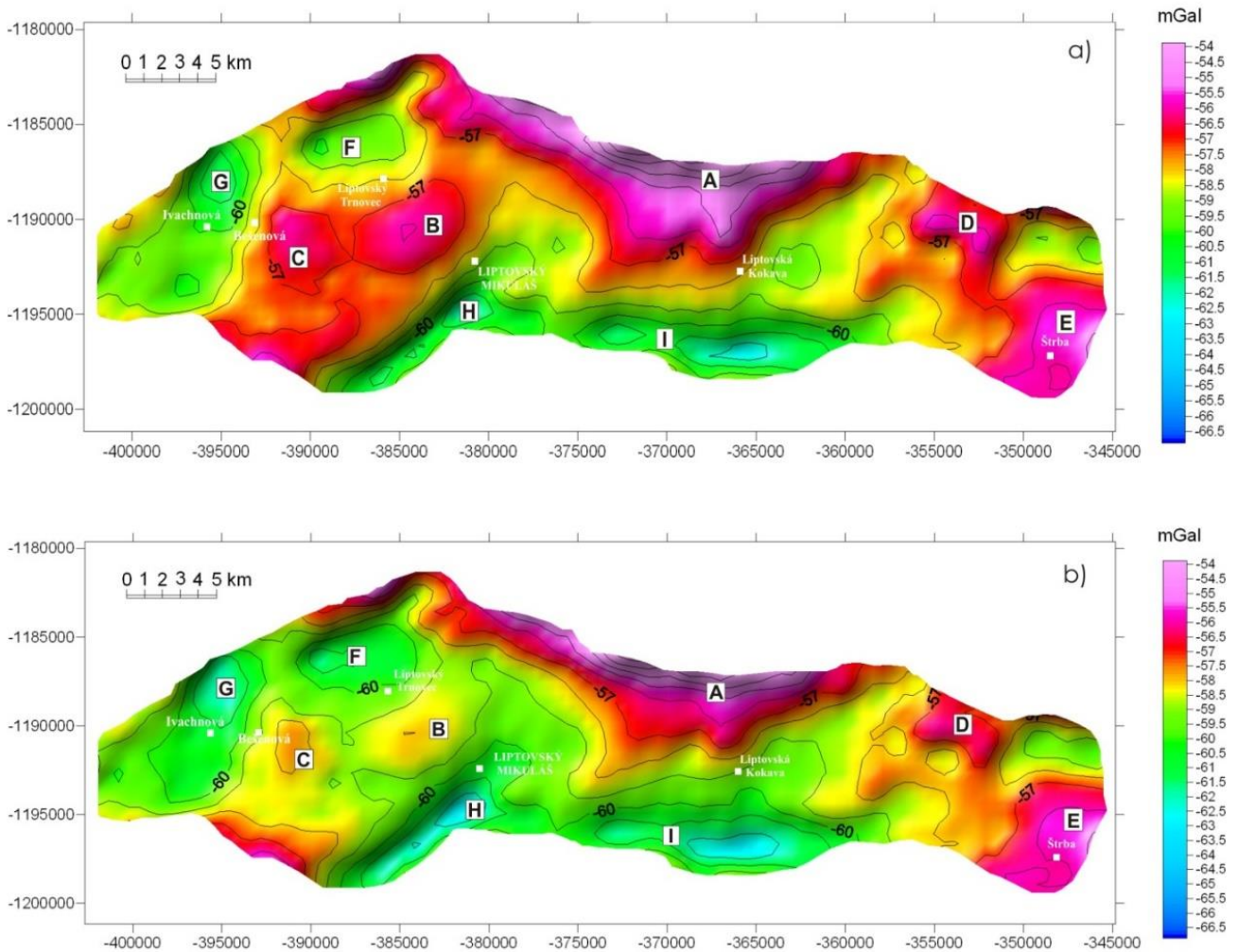


Рис. 7.1. Карти залишкового гравітаційного поля фундаменту: а – постійна густина, б – лінійна зміна густини з 2,53 до 2,60 г/см³.

ефективний метод гравітаційного моделювання. Принципова перевага цього методу над колишніми підходами полягає в тому, що стало можливим здійснити розрахунок 3D гравітаційного ефекту аномальних тіл з використанням їхніх реальних контурів і визначати його як з постійною густиною, так із змінною з глибиною (лінійно або експоненційно) [Dirkzwager et al., 2000].

Також було використано добре відомий метод пошарового вилучення гравітаційного ефекту (Hammer, 1963), суть якого полягає в послідовному розрахунку і вилученню гравітаційного ефекту шарів, параметризація яких визначена краще, ніж тих, що залягають глибше.

Розрахунки 3D гравітаційного ефекту виконано для аномального шару з довільними верхніми і нижніми границями. Осадова товща апроксимувалася системою вертикальних призм. Її верхня поверхня утворена рельєфом басейну, а нижня – рельєфом дотретинного фундаменту. Для того щоб оцінити внесок гравітаційного ефекту четвертинного та палеогенового осадового заповнення до загального гравітаційного ефекту, виконано розрахунки для шести різних значень густини.

ВИСНОВКИ

Представлена дисертаційна робота присвячена створенню нової автоматизованої системи кількісної 3D інтерпретації даних потенціальних полів (GMT–Auto) та її практичному випробуванню на прикладах основних геологічних структур України, а також деяких структур зарубіжжя. Автоматизована система (GMT–Auto) орієнтована на практичне використання як в наукових, так і в промислових геофізичних організаціях.

Основні результати, отримані авторкою у процесі роботи над дисертацією:

1. Розроблено новий програмний комплекс автоматизованої системи інтерпретації гравітаційного, магнітного і теплового полів (GMT–Auto), за допомогою якого можливо за заданими полями будувати тривимірні моделі з безперервним розподілом в них фізичних параметрів. Це дає змогу проаналізувати поля детальніше і повніше, оскільки наближення розрахункового поля до модельного значною мірою залежить від ступеня апроксимації середовища в моделі.

2. Розроблено основні принципи роботи створених програмних комплексів *Geophys0 SpaceMap, Isohypse*, які призначені для автоматизації введення в комп'ютер геолого-геофізических карт із подальшим перетворенням введених даних у цифровий вигляді. Використання створених комплексів істотно полегшує та прискорює процес інтерпретації геофізичних полів (гравітаційного, магнітного, геотермічного) методом тривимірного чисельного моделювання. Застосування програм дає змогу створювати електронні бази даних геолого-геофізичної інформації, які раніше зберігалася тільки на паперових носіях.

3. Показано, що гравітаційні задачі В.М. Новоселицького та Б.В. Нумерова об'єднуються і узагальнюються, якщо пласт апроксимувати набором довільно зрізаних неоднорідних вертикальних прямокутних призм. За такого підходу, легко моделюються тривимірні шаруваті геологічні об'єкти з практично довільною зміною густини та будь-яким розташуванням контактних поверхонь, число яких не обмежується.

4. Вперше дано рішення прямої задачі магнітометрії для довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми і чотирикутної зрізаної піраміди з анізотропною і ізотропною магнітною сприйнятливістю. Рішення призначені для вивчення геологічних структур і побудови моделі рудних об'єктів. Використовуючи спільно аналогічні рішення в гравіметрії, магнітометрії і геотермії, зручно будувати локальні і регіональні комплексні геофізичні моделі за сукупністю геолого-геофізичних даних.

5. Використано закономірності В.М. Завойського щодо зв'язку орієнтації тензора магнітної сприйнятливості стосовно анізотропних монокліналей і складчастих структур та показано, що вони істотно полегшує теорію і практику вирішення тривимірних прямих задач магнітометрії для анізотропних середовищ.

6. Для неоднорідної довільно зрізаної вертикальної прямокутної призми вперше дано розв'язок прямих стаціонарних задач геотермії в однорідному півпросторі щодо розподілу тепла і теплового потоку. Прийнято, що коефіцієнт теплопровідності λ в призмі постійний, а густина теплогенерації Q така, що

змінюється лінійно уздовж горизонтальних координат на верхньому і нижньому обмеженнях і лінійно або експоненціально уздовж будь-якої вертикальної лінії, причому так, що в вершинах призми густина теплогенерації приймає задані значення. Використання призми зручно для апроксимації тривимірних неоднорідних горизонтально-шаруватих локальних і регіональних геологічних середовищ. Знайдені рішення полегшують створення автоматизованих систем кількісної інтерпретації геотермічних даних в інтерактивному режимі.

7. Сформульована і строго вирішена узагальнена стаціонарна одномірна задача геотермії Релея–Тихонова для сукупності горизонтальних нескінченних плоскопаралельних шарів, розташованих в нижньому півпросторі, які мають або не мають джерел тепла. Із знайдених рішень рішення являють собою як окремий випадок.

8. Дано два додаткових рішення стаціонарної задачі для визначення поширення температури в приповерхневому шарі, що не містить джерел теплоти і лежить на шарі, в якому джерела теплоти є.

9. Створено комплекс «ПЕРЕГЛЯД» і програму UnionMaps та показано, що спільно з технологічними комплексами вирішення різних геофізичних завдань вони дають змогу виконувати інтерпретацію геофізичних даних методом підбору. Використання створених програм буде тим ефективніше, чим досконаліші комплекси рішення прямих (або зворотних) задач геофізики (гравіметрії, магнітометри, геотермії).

10. На конкретних прикладах продемонстровано широке застосування створеної нової автоматизованої системи (GMT–Auto) при вирішенні практичних завдань, які пов'язані з вивченням складної будови різних геологічних структур за геофізичними даними. За її допомогою побудовані, зокрема, нові тривимірні густинні моделі осадових басейнів (Дніпровсько-Донецької западини і Донбасу), Прип'ятського прогину, Карпатсько-Паннонського регіону, Чорноморської западини, північно-західного шельфу Чорного моря, щитів (Українського, Балтійського) і Воронезького кристалічного масиву. Побудовані моделі реальних геологічних структур можуть бути використані при вирішенні практичних завдань геології, тектоніки, а також при пошуках корисних копалин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Старостенко В.И., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Орлюк М.И., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Максимчук П.Я., Козленко Ю.В., Козленко М.В., **Легостаева О.В.**, Лебедь Т.В., Савченко А.С. (2015). *Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины*. Киев: Галактика, 252 с.
2. Кендзера О.В., Омельченко В.Д., Лисинчук Д.В., **Легостаева О.В.**, Гринь Д.М., Коломієць К.В., Толкунов А.П., Чулков С.С. (2019). *Глибинна будова літосфери та сейсмічна небезпека території України*. Київ: Наук. думка, 202 с.
3. Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2021). *Неоднородности земной коры Украины и суміжних регіонів за результатами 3D гравітаційного моделювання*. Київ: Наук. думка, 202 с.

Свідцтво про реєстрацію авторського права

Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2006). Комп'ютерна програма «3-Д моделювання потенційних полів». Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16867, дата реєстрації 06.06.2006.

Статті в наукових виданнях

1. Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Гарецкий Р.Г., Данкевич И.В., Каратаев Г.И. (2000). Припятский прогиб: гравитационный эффект осадочной толщи и плотностные неоднородности верхней части фундамента. *Геофиз. журн.*, 22(4), 62—74.
2. Егорова Т.П., Стифенсон Р.А., Козленко В.Г., Старостенко В.И., Заворотько А.Н., **Легостаева О.В.** (2000). Трехмерное гравитационное моделирование строения земной коры Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса. *Геофиз. журн.*, 22(6), 81—92
3. 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, 53—66. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00059-5).
4. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., **Легостаева О.В.**, Пивоваров В.Л., Мельничук П.Н. (2003). Плотность осадочных комплексов Черного моря. *Геофиз. журн.*, 25(2), 54—69
5. Старостенко В.И., Кутас Р.И., **Легостаева О.В.** (2003). Решение прямой задачи геотермии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы. *Физика Земли*, (12), 64—71.
6. Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2003). Строение земной коры Коростенского плутона (северная часть Украинского щита) по

- результатам трехмерного плотностного моделирования. *Доп. НАН України*, (11), 113—120.
7. Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б., Павлюк Е.В., Шарыпанов В.М. (2004). 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.*, 26(1), 3—13.
 8. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I., Rusakov O., Nikishin A., Georgiev G., Gerasimov M., Dimitriu R., **Legostaeva O.**, Pchelarov V., Sava C., Stephenson R. (2004). Topography of the crust-mantle boundary beneath the Black Sea basin. *Tectonophysics*, 381, 211—233. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.08.001>.
 9. 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 1.8—1.74 Ga anorthosite-rapakivi granite Korosten Pluton in the NW Ukrainian Shield: a 3-D geophysical reconstruction of the deep crustal structure. *Tectonophysics*, 381, 5—27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.023>.
 10. Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б. (2004). В.М Новоселицкий и задача для пласта. *Горное эхо*, (4), 51—56.
 11. Bielik M., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Starostenko V., Dérerová J., Šefara J. (2004). Stripped gravity map of the Carpathian-Pannonian Basin Region. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, 31, 107—117.
 12. Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Кутас Р.И., **Легостаева О.В.** (2005). Разломная тектоника консолидированной коры северо-западного шельфа Черного моря. *Геофиз. журн.*, 27(2), 195—207.
 13. Bielik M., Makarenko I., Starostenko V., **Legostaeva O.**, Dérerová J., Šefara J., Pasteka R. (2005). New 3D gravity modeling In the Carpathian-Pannonian basin region. *Contributions of Geophysics and Geodesy*, 35(1), 65—78.
 14. Старостенко В.И., Завойский В.Н., **Легостаева О.В.** (2005). Прямая задача магнитометрии для трехмерных тел сложной формы с анизотропной магнитной восприимчивостью. *Физика Земли*, (7), 81—90.
 15. Старостенко В.И., Кутас Р.И., Шуман В.Н., **Легостаева О.В.** (2006). Обобщение стационарной задачи геотермии Рэлея—Тихонова для горизонтального слоя. *Физика Земли*, (12), 84—91.
 16. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2007а). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.*, 29(2), 17—41.
 17. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2007б). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофиз. журн.*, 29(5), 3—27.
 18. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.** (2008). Плотностная модель земной коры вдоль профиля DOBRE. *Геофиз. журн.*, 30(1), 28—41.
 19. Szalaiová E., Bielik M., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Hók J., Starostenko V., Šujan M., Šefara J. (2008). Calculation of the stripped gravity map with high degree of

- accuracy: a case study of Liptovská Kotlina Basin (Northern Slovakia). *Geological Quarterly*, 52(2), 103—114.
20. Старостенко В.И., Шуман В.Н., Иващенко И.Н., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С., Скриник О.Я. (2009). Магнитные поля трехмерных анизотропных тел: теория и практика вычислений. *Физика Земли*, (8), 20—35. <https://doi.org/10.1134/s1069351309080047>
 21. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., **Легостаева О.В.** (2010). Геофизические неоднородности литосферы мегавпадины Черного моря. *Геофиз. журн.*, 32(5), 3—20. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117496>.
 22. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С. (2010). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса. *Геофиз. журн.*, 32(6), 175—214. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i6.2010.117461>.
 23. Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Савченко А.С., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. (2011). Об автоматизированной интерактивной обработке геофизических изображений геологических и геофизических объектов. *Геофиз. журн.*, 33(1), 54—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i1.2011.117325>.
 24. Sumaruk Yu.P., Starostenko V.I., **Legostaieva O.V.** (2011). Geomagnetic observatories of Ukraine in the Global Network Intermagnet. *Russian Journal of Earth Sciences*, 12, Es2002. doi:10.2205/2011ES000506.
 25. Krajnak M., Bielik M., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Starostenko V., Bosansky M. (2012). The first stripped gravity map of the Turcianska Kotlina Basin. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 181—199.
 26. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С. (2012). Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.*, 34(6), 113—132. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116718>.
 27. Старостенко В.И., Шуман В.Н., Пашкевич И.К., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С. (2013). Методы восстановления гармонических функций по магнитному полю ΔT и функция В.Н.Страхова ΔS : обзор. *Физика Земли*, (1), 151—160. <https://doi.org/10.1134/s1069351313010151>
 28. Bielik M., Krajňák M., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Starostenko V., Bošanský M., Grinč M., Hok J. (2013). 3D gravity interpretation of the pre-Tertiary basement in the intramontane depressions of the Western Carpathians: a case study from the Turies Basin. *Geologica Carpathica*, 64(5), 399—408. <https://doi.org/10.2478/geoca-2013-0027>
 29. Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Šroda P., Grad M., Kovacs I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedüs E., Komminaho K., **Legostaieva O.**, Tiira T., Tolkunov A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East

- European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.
30. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., **Legostaieva O.**, Tiira T., Tolkunov A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201, 406—428. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv018>.
 31. Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б., Савченко А.С. (2015). Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофиз. журн.*, 37(1), 42—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322>.
 32. Starostenko V.I., Rusakov O.M., Pashkevich I.K., Kutas R.I., Makarenko I.B., **Legostaieva O.V.**, Lebed T.V., Savchenko A.S. (2015). Heterogeneous structure of the lithosphere in the Black Sea from a multidisciplinary analysis of geophysical fields. *Геофиз. журн.*, 37(2), 3—28. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111298>.
 33. Гвишиани А.Д., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Соловьев А.А., **Легостаева О.В.** (2015). Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл. *Геомагнетизм и аэрономия*, 55(3), 314—322. <https://doi.org/10.1134/s0016793215030093>
 34. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2015). Плотностная неоднородность земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Геофиз. журн.*, 37(3), 3—21.
 35. Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Шарыпанов А.В., Савченко А.С., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. (2016). Интерактивный программный комплекс Isohypse для построения трехмерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование. *Геофиз. журн.*, 38(1), 30—42. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107720>.
 36. Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Rusakov O., Czuba W., Środa P., Grad M., Guterch A., Flüh E., Thybo H., Artemieva I., Tolkunov A., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Kolomiyets K., **Legostaieva O.**, Dannowski A., Shulgin A. (2017). DOBRE-2 WARR profile: the Earth's upper crust across Crimea between the Azov Massif and the northeastern Black Sea. In: M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds.), *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus* (Vol. 428, pp. 199—220). Geol. Soc., London, Spec. Publ. <https://doi.org/10.1144/sp428.11>
 37. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2017). Состав земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита (типы коры) и закономерности размещения месторождений рудных полезных ископаемых. *Геофиз. журн.*, 39(5), 27—46. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i5.2017.112338>.

38. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2018). Трехмерная плотностная модель земной коры центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.*, 40(3), 27—53. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137172>.
39. Bielík 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>.
40. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Куприенко П.Я., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2019). Плотностная неоднородность земной коры Черноморской мегавпадины и прилегающих территорий по данным трехмерного гравитационного моделирования. I. Региональное распределение плотности на разных глубинах. *Геофиз. журн.*, 41(4), 3—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177363>.
41. Bielík M., Zeyen H., Tašarová Z., Alasonati, Starostenko V., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Goetze H.-J., Horváth F., Pašteka R., Dérerová J., Pánisová J., Grinč M., Šimonová B. (2019). Integrated geophysical modelling of the lithosphere in the Carpathian-Pannonian region: A review. *Geologica Carpathica*, 70, 166—170.
42. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Куприенко П.Я., **Легостаева О.В.** (2020). Плотностная неоднородность земной коры Черного моря и прилегающих территорий по данным трехмерного гравитационного моделирования. II. Плотностные разрезы. *Геофиз. журн.*, 42(1), 3—33. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i1.2020.195462>.
43. Кудин Д.В., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., **Легостаева О.В.** (2021). Система ускоренной подготовки квазиокончатальных данных стандарта Интермагнет. *Геомагнетизм и аэрономия*, 61(1), 46—59.

Тези доповідей і матеріали конференцій

1. Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2000). Трехмерное моделирование при изучении гравитационного эффекта осадочной толщи и плотностных неоднородностей фундамента Припятского прогиба. *Тез. Докл. междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 35—37). Москва.
2. Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2000). Восточная часть Днепровско-Донецкой впадины и Донбасс: новая плотностная модель земной коры. *Тез. Докл. междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 37—38). Москва.
3. **Легостаева О.В.**, Старостенко В.И. (2000). Автоматизированная система прямых решения задач гравиметрии: принципы, алгоритмы, примеры использования. *Тез. Докл. междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского*

«Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (С. 113). Москва.

4. Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Заворотько А.Н. (2000). Решение обратной задачи гравиметрии для нескольких контактных поверхностей: автоматизированная реализация. *Тез. Докл. междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 173). Москва.
5. Buryanov V.B., Makarenko I.B., Orovetsky Y.P., Starostenko V.I., **Legostaeva O.V.** (2000). An analysis of positive gravity anomalies of the Black Sea periphery. *International Geophysical Conference & Exposition, Romanian Geophysics, Book of Abstract* (Vol. 7, pp. 380—383).
6. **Legostaeva O.V.**, Starostenko V. I., Makarenko I. B. (2000). Using 3-D gravity modeling of sedimentary basin for study of the structure features: Black and Mediterranean seas. *Geophysical Research Abstracts, 25th General Assembly. Vol. 2. CD ROM*.
7. Buryanov V.B., **Legostaeva O.V.**, Makarenko I.B., Orliuk M., Pashkevich I.K., Starostenko V.I. (2000). The Korosten Pluton: the Earth's crust structure on the base of 3-D gravity and magnetic modeling. *Геофиз. журн.*, 22(4), 81.
8. Pashkevich I.K., Buryanov V.B., Kutas R.I., **Legostaeva O.V.**, Makarenko I.B., Starostenko V.I. (2000). A joint analysis of the results of modelling the geophysical fields of the Donbas and the eastern part of the Dnieper Palaeorift. *Геофиз. журн.*, 22(4), 117.
9. **Legostaeva O.V.**, Makarenko I.B., Starostenko V.I. (2000). An analysis of density change with depth in the sediments of the Black Sea Basin. *Геофиз. журн.*, 22(4), 109.
10. Buryanov V.B., Gerasimov M.E., **Legostaeva O.V.**, Makarenko I.B., Rusakov O.M., Starostenko V.I. (2000). Preliminary models and comparison of the lower crust and upper mantle density patterns of the Black and Aegean seas. *Геофиз. журн.*, 22(4), 82.
11. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I., **Legostaeva O.**, Pashkevich I., Krylikowski C., Petecki Z., Twarogowski J., Сієнла Е., Wybraniec S., Krzywiec P., Garetsky R., Karataev G., Dankevich I., Belov Yu., Golobokov S., Jacyna J., Korablova L., Nasedkin V., Bogdanova S., Kozlovskaya E. (2000). The tectonic pattern of the western part of the East European Craton based on integrated gravity and magnetic studies: a project outline. *Геофиз. журн.*, 22(4), 129.
12. Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., Пашкевич И.К., Орлюк М.И., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2001). Строение земной коры Коростенского плутона (Украинский щит): результаты трехмерного моделирования потенциальных полей. *Тез. докл. Междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 18—20). Москва: ОИФЗ.
13. Бурьянов В.Б., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.**, Старостенко В.И., Русаков О.М. (2001). Методика изучения земной коры акваторий с большой мощностью осадочной толщи 3-Д гравитационным моделированием (на примере северо-

- западного шельфа Черного моря). *Тез. докл. Междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 21—22). Москва: ОИФЗ.
14. **Легостаева О.В.**, Старостенко В.И. (2001). 2-Д и 3-Д гравитационное моделирование с использованием автоматизированной системы. *Тез. докл. Междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 58). Москва: ОИФЗ.
 15. Старостенко В.И., Заворотько А.Н., **Легостаева О.В.**, Макаренко И.Б., Егорова Т.П., Бурьянов В.Б., Русаков О.М. (2001). Об опыте решения обратной линейной задачи гравиметрии при изучении региональной структуры: еще раз к вопросу о соотношении геофизики и математики. *Тез. докл. Междунар. конф.-семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 90—91). Москва: ОИФЗ.
 16. **Legostaeva O.V.**, Makarenko I.B., Starostenko V.I., Stovba S.N. (2001). The Comparative Analysis of Linear and Exponential Change Density with Depth in sedimentary Basins (An Example of the Black Sea Basin). *Geophysical Research Abstracts, European Union of Geosciences*, 531.
 17. Makarenko I.B., Buryanov V.B., **Legostaeva O.V.**, Starostenko V.I., Rusakov O.M. (2001). A new Approach to 3-D Gravity Modelling and its Tectonic Implications in the Eastern Mediterranean. *Geophysical Research Abstracts, EUG XI*, 317.
 18. Buryanov V.B., Makarenko I.B., Starostenko V.I., **Legostaeva O.V.** (2001). Structure of the Earth's crust of the Korosten pluton, Northern Ukrainian shield, based on 3-D gravity modeling. *Abstracts of a joint meeting of the Eurobridge and Svekalapko project, VSEGEI, St-Peterburg* (pp. 9—10).
 19. Starostenko V.I., **Legostaeva O.V.** (2001). The gravity relief correction in geodetic problems. *AROPA Workshop Proceedings in the "Cahiers of ECGS", Prepared and printed at Schmidt United Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow* (pp. 9—10).
 20. Makarenko I., **Legostaeva O.**, Bielik M., Starostenko V., Dererova J., Sefara J. (2002). 3D gravity effect of the sedimentary complexes in the Carpathian-Pannonian region. *Geologia Carpathica*, 53(special issue).
 21. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.**, Русаков О.М., Пиповаров В.Л. (2002). Плотностные свойства осадочной толщи Черноморской впадины. *Тез. докл. IV Междунар. конф. «Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона»* (С. 183—184).
 22. Kuprienko P.Ya., Starostenko V.I., Makarenko I.B., **Legostaeva O.V.** (2006). Density heterogeneities of the consolidated crust and main latitudinal zones of the north part of Volhyno-Podolian plate. *Тез. семинара: «Главные ослабленные зоны литосферы Западной Балтики»*. *Геофиз. журн.* 28(6), 141—143.
 23. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.**, Красовский А.С. (2006). Глубинное строение центральной части Украинского

- щита по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Вопросы теории и практики комплексной геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33-й сессии Международ. семинара им. Д.Г. Успенского* (С. 174—178). Екатеринбург: Ин-т геофизики УрО РАН.
24. Pashkevich I., Starostenko V., Makarenko I.B., **Legostaieva O.**, Rusakov O., Kutas R., Stovba S. (2006). Crust fault systems on the NW shelf of the Black Sea from potential fields and other geophysical data: tectonic implications. *WIGFR 2006, 2-nd Workshop on International Gravity Field Research 2006, Smolenice, Slovak Republic CD-ROM* (pp. 58—61).
 25. Bielik M., Makarenko I.B., **Legostaeva O.**, Starostenko V., Dererova J., Shefara J. (2006). 3D gravity effect of the sedimentary basin in the Carpathian-Pannonian basin. *WIGFR 2006, 2-nd Workshop on International Gravity Field Research 2006, Smolenice, Slovak Republic, CD-ROM* (P. 16).
 26. Szalaiova E., Makarenko I.B., **Legostaeva O.**, Szalaiova V. et al. (2006). 3D gravity modeling in Liptovska Kotlina Basin. *WIGFR 2006, 2-nd Workshop on International Gravity Field Research 2006, Smolenice, Slovak Republic, CD-ROM* (P. 97).
 27. Bielik M., Zeyen H., Dererova J., Makarenko I.B., **Legostaeva O.**, Starostenko V., Salman K. (2006). 3D Gravity Modeling and 2D Integrated Geophysical Modeling for Determination of the Continental Lithospheric Thermal Structure in the Carpathian-Pannonian Region. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2006, Abstract*.
 28. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2007). Вещественный состав земной коры Украинского щита по результатам трехмерного гравитационного моделирования. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей* (С. 156—160). Москва: ИФЗ РАН.
 29. Старостенко В.И., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.** (2007). Стрoение литосферы Черного моря по геофизическим данным. *Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазоносных регионов Украины. Тез. докл. VII междунар. конф. Украины «Крым-2007», Симферополь* (С. 61—63).
 30. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.** (2008). Распределение плотности в земной коре в сечении профиля ГСЗ DOBRE. *Материалы 35-й сессии Международ. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 290—292). Ухта: УГТУ.
 31. Пашкевич И.К., Русаков О.М., Старостенко В.И., Кутас Р.И., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.** (2008). Разломная тектоника консолидированной коры по данным анализа потенциальных полей и нефтегазоносность северо-западного шельфа Черного моря. *Материалы 35-й сессии Международ. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 196—199). Ухта: УГТУ.

32. Савченко А.С., Старостенко В.И., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.** (2008). Практическое использование автоматизированного комплекса при интерпретации данных потенциальных полей методом подбора. *Материалы 35-й сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 271—274). Ухта: УГТУ.
33. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С. (2008). Основные типы земной коры Украинского щита по результатам оценки вклада каждого вещественного слоя в полную мощность коры. *Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Материалы 14-й междунар. конф.* (С. 218—221). Петрозаводск: КрНЦ РАН.
34. Starostenko V.I., Rusakov O.M., Pashkevich I.K., Kutas R.I., Makarenko I.B., **Legostaieva O.V.** (2008). Fault systems in the Black Sea basin consolidated crust (by geophysical data). *Petroleum Geology & Hydrocarbon Potential of Caspian and Black Sea Regions, EAGE, Baku, Azerbaijan* (P. A16).
35. Pashkevich, I., Rusakov, O. Kutas, R., Starostenko, V. Makarenko I.B., **Legostaieva O.V.** (2009). Fault tectonics of the consolidated crust on the NW shelf of the Black Sea and its relevance to the hydrocarbon potential. *2nd International Symposium on the Geology of the Black Sea Region (ISGB). Abstract book, Ankara, Turkey* (P. 156).
36. Пашкевич И.К., Русаков О.М., Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Кутас Р.И. **Легостаева О.В.** (2009). Разломная тектоника консолидированной коры Керченско-Таманского прогиба Черного моря по данным анализа потенциальных полей. *Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа. Тез. докл VIII междунар. конф. «Крым-2009», Симферополь* (С. 99—101).
37. Надежка Л.И., Дубянский А.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2009). Некоторые черты глубинного строения Украинского щита и Воронежского кристаллического массива. *Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича: Материалы конф., Екатеринбург* (С. 254—258).
38. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2010) Основные типы земной коры Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Материалы XVI междунар. конф. «Свойства, структура, динамика и минералогения литосферы Восточно-Европейской платформы»* (Т. 2, С. 250—253). Воронеж: Научная книга.
39. Starostenko V., Rusakov O., Makarenko I.B., Pashkevich I., Kutas R.O. **Legostaieva O.** (2010). Lithospheric inhomogeneity in the Black Sea from geophysical data. Abstracts of International Conference “Geodynamical Phenomena: From Observations and Experiments to Theory and Modelling”. *Геофиз. журн.*, 32(4), 173—174.
40. Starostenko V., Kuprienko P., Makarenko I.B., **Legostaieva O.**, Savchenko A. (2010). Variations in the crustal types of the Dnieper-Donets Basin and surrounding

- areas from 3D gravity modeling. Abstracts of International Conference “Geodynamical Phenomena: From Observations and Experiments to Theory and Modelling”. *Геофиз. журн.*, 32(4), 170—173.
41. Starostenko V.I., Krupskiy B.L., Pashkevich I.K., Rusakov O.M., Makarenko I.B., Kutas R.I., Gladun V.V., **Legostaieva O.V.**, Lebed T.V., Maksymchuk P.Ya. (2011). Fault Tectonics of the NE Black Sea Shelf and Its Relevance to Hydrocarbon Potential. *Search and Discovery Article №30155, Posted March 25, 2011.*
 42. Starostenko V.I., **Legostaieva O.V.**, Sumaruk Yu.P. (2011). INTERMAGNET in Ukraine. *International Workshop “Artificial Intelligence in the Earth’s Magnetic Field Study. INTERMAGNET Russian Segment”*. 26—28 January 2011, Russian Federation, Yaroslavl region, Uglich, CD.
 43. Starostenko V.I., Shuman V.N., **Legostaieva O.V.**, Savchenko A.S. (2011). Theory and practice of calculations of magnetic fields of anisotropic bodies. *International Workshop “Artificial Intelligence in the Earth’s Magnetic Field Study. INTERMAGNET Russian Segment”*. 26—28 January 2011, Russian Federation, Yaroslavl region, Uglich, CD.
 44. Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., **Легостаева О.В.**, Савченко А.С., Надежка Л.И., Золототрубова Э.И., Ипполитов О.М. (2012). Плотностные характеристики литосферы юго-западного сегмента Восточно-Европейской платформы. *Материалы 39-й сессии Междунар. научн. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей»* (С. 252—257). Воронеж.
 45. Пашкевич И.К., Русаков О.М., Старостенко В.И., Кутас Р.И., И.Б. Макаренко, **Легостаева О.В.**, Лебедь Т.В. (2012). Газоносность северо-западного шельфа Черного моря, системы разломов и особенности потенциальных полей. *Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа: Тез. докл. X Междунар. конф. «Крым-2012»*. Симферополь (С. 63—64).
 46. Starostenko V.I., Dolmaz M.N., Kutas R.I., Rusakov O.M., Öksüm E., Hisarli Z.M., Okyar M., Kalyoncuoglu U.E., Tutunsatar H.E., **Legostaieva O.V.** (2012). Preliminary results of the joint NASU — TUBITAK project “The thermal structure of the crust in the Black Sea from magnetic and heat flow data”. *Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа: Тез. докл. X Междунар. конф. «Крым-2012»*. Симферополь (С. 31—32).
 47. Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Tolkunov A., Czuba W., Šroda P., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Grad M., Guterch A., Kolomiyets K., Thybo H., Dannowski A., Flüh E., **Legostaieva O.** (2013). Velocity model of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE’99 transect. *Geophysical Research Abstracts, vol. 15, EGU2013-7728, 2013, EGU General Assembly.*
 48. Starostenko V. I., Sumaruk Yu.P., **Legostaieva O.V.** (2013). Investigation of magnetic field of the Earth and Russian-Ukrainian segment of INTERMAGNET.

Partnership conference “Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining”, Abstracts, Kaluga, Russia, 30.9.2013 — 02.10.2013, CD.

49. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Šroda P., Sosson M., Volfman Yu., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., **Legostaieva O.**, Thybo H., Tiira T., Tolkunov A. (2014). Seismic structure along DOBRE-5 profile, from the north Dobrogea orogen across the SW shelf of the Black Sea and Crimea peninsula, Ukraine. *16th SEISMIX International Symposium. Abstracts. October 12—17, 2014, Barcelona* (P. 27).
50. Starostenko V.I., Dolmaz M.N., Kutas R.I., Rusakov O.M., Öksüm E., Tutunsatar H.E., Hisarli Z.M., Okyar M., Kalyoncuoglu U.E., **Legostaieva O.V.** (2014). Results of the Joint Project (NASU-TUBITAK) “The Thermal structure of the crust in the Black Sea Analysis of magnetic and heat flow data”. *EGU 2014-2699. PREVIEW. EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, 16.
51. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Šroda P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Yu., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., **Legostaieva O.**, Tiira T., Tolkunov A. (2014). The crust and upper mantle in the Scythian Platform: seismic model along the DOBRE-5 profile (the northwestern Black Sea and the Crimean peninsula). *International final symposium “Evolution of the Black Sea to Central Asia Tethyan Realm since the Late Paleozoic”, DARIUS Programme, Abstracts volume, December 8—9 2014. University Pierre & Marie Curie, Paris, France* (pp. 147—149).
52. Starostenko V., **Legostaieva O.**, Savchenko A., Kuprienko P. (2015). Automated software system for interpretation of the potential fields (GMT-Auto). *7th BgGS National Conference With International Participation “GEOPHYSICS 2015”, Sofia, May 20—23, 2015. CD ROM.*
53. Bielik M., Grinc M., Zeyen Y., Starostenko V., **Legostaieva O.**, Bosansky M., Krajnak M., Pasteka R., Dererova J., Hlavnova P. (2015). Intergrated interpretation of gravity field: case studies from Western Carpathians and Central Europe. *11th Slovak Geophysical Conference 2015, Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering* (P. 12).
54. Куприенко П.Я., Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Савченко А.С., **Легостаева О.В.** (2018). Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. *Геологія і корисні копалини України: Зб. тез наук. конф., присвяченої 100-річному ювілею Національної академії наук України та Державної служби геології та надр України, Київ, 2—4 жовтня 2018 р.* (С. 139—140).
55. Макаренко И.Б., Куприенко П.Я., Старостенко В.И., **Легостаева О.В.** (2019). Плотностная неоднородность осадочной толщи Черноморской мегавпадины и прилегающих территорий по данным трехмерного гравитационного моделирования. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: *Сб. научн. трудов. Вып. 1 (46), Пермь, 20—26 янв. 2019* (С. 255—260).
56. Bielik M., Zeyen H., Tašarová Z. Alasonati, Starostenko V., Makarenko I., **Legostaieva O.**, Goetze H.-J., Horváth F., Pašteka R., Dérerová J., Pánisová J., Grinč

- M., Šimonová B. (2019). Integrated geophysical modelling of the lithosphere in the Carpathian-Pannonian region. A review. *Geologica Carpathica*, 70 Conference, 166—170.
57. Janik T., Starostenko V., Aleksandrowski P., Yegorova T., Czuba W., Środa P., Murovskaya A., Zajats K., Głuszyński A., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Wójcik D., Omelchenko V., **Legostaieva O.**, Mechie J., Tolkunov A., Amashukeli T., Gryn' D., Chulkov S. (2020). TTZ-South seismic profile reveals the lithospheric structure along the SW border of the East European Craton in SE Poland and NW Ukraine. *Abstracts of SEISMIX 2020 — 19th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, 15—20 March 2020, Perth, Australia*.
58. Janik T., Starostenko V., Aleksandrowski P., Yegorova T., Czuba W., Środa P., Murovskaya A., Zajats K., Głuszyński A., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Wójcik D., Omelchenko V., **Legostaieva O.**, Mechie J., Tolkunov A., Amashukeli T., Gryn' D., Chulkov S. (2020). The transition of the East European cratonic lithosphere to that of the Palaeozoic collage of the Trans-European Suture Zone as depicted on the TTZ-South deep seismic profile (SE Poland to NW Ukraine). *Geophysical Research Abstracts vol. 22, 2020 EGU, General Assembly 2020*.

АНОТАЦІЯ

Легостаєва О.В. Математичне і програмне забезпечення автоматизованої системи 3D інтерпретації даних потенціальних полів (GMT–Auto). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103–Науки про Землю). – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, 2021.

Тривимірне моделювання геологічних структур давно стало одним з найпотужніших способів кількісної інтерпретації даних гравіметрії, магнітометрії і теплового поля, які широко використовуються в геофізиці. Успіх процесу інтерпретації геолого-геофізичних даних істотною мірою залежить від технологічних комп'ютерних програм, за допомогою яких можна швидко і чітко отримати інформацію про середовище, комбінувати її з іншими даними, експортувати в існуючі програмні продукти тощо. Розроблено новий комплекс програм для автоматизованої 3D інтерпретації гравітаційного, магнітного і теплового полів (GMT–Auto), який дає змогу за заданими полями будувати тривимірні моделі з безперервним розподілом в них фізичних параметрів. Це дає можливість проаналізувати поля детальніше і повніше, оскільки наближення розрахункового поля до модельного значною мірою залежить від ступеня апроксимації середовища в моделі.

Автоматизована система GMT–Auto складається з трьох основних блоків: 1) автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт і побудова їхніх цифрових моделей, які є вхідними даними для розв'язання прямої чи оберненої задачі; 2) розв'язання прямої задачі гравіметрії,

магнітометрії і геотермії для тривимірних неоднорідних пластів, які апроксимуються сукупністю неоднорідних вертикальних призм з довільно розташованими верхньою і нижньою основами; 3) представлення результатів розв'язання прямих задач у графічному вигляді.

Використання створеної автоматизованої системи істотно полегшує і прискорює процес інтерпретації геофізичних полів і суттєво збільшує достовірність тлумачення об'ємного геологічного середовища. Автоматизована система (GMT–Auto) знайшов широке застосування при вирішенні практичних завдань, які пов'язані з вивченням складної будови різних геологічних структур за геофізичними даними. За її допомогою побудовані, зокрема, нові тривимірні густинні моделі Дніпровсько-Донецької западини і складчастого поясу Донбасу, Прип'ятського прогину, Карпатсько-Паннонського регіону, Чорноморської западини, північно-західного шельфу Чорного моря, нідерландської прибережної зони, щитів (Українського, Балтійського) і Воронежського кристалічного масиву. Побудовані моделі реальних геологічних структур можуть бути використані при вирішенні практичних завдань геології, тектоніки, а також при пошуках і розвідці корисних копалин.

Ключові слова: математичне забезпечення, програмне забезпечення, автоматизована система, 3D моделювання потенціальних полів, сканування.

АННОТАЦІЯ

Легостаева О.В. Математическое и программное обеспечение автоматизированной системы 3D интерпретации данных потенциальных полей (GMT–Auto). Квалификационный научный труд на правах рукописи. – Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика (103–Науки о Земле). – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Трехмерное моделирование геологических структур давно стало одним из самых мощных способов количественной интерпретации данных гравиметрии, магнитометрии и теплового поля, которые широко используются в геофизике. Успех процесса интерпретации геолого-геофизических данных в существенной степени зависит от технологических компьютерных программ, с помощью которых можно быстро и четко получить информацию о среде, комбинировать ее с другими данными, экспортировать в существующие программные продукты и др. Разработан новый комплекс программ для автоматизированной 3D интерпретации гравитационного, магнитного и теплового полей (GMT–Auto), который позволяет по заданным полям строить трехмерные модели с непрерывным распределением в них физических параметров. Это дает возможность проанализировать поля подробнее и полнее, поскольку приближение расчетного поля к модельному в значительной мере зависит от степени аппроксимации среды модели.

Автоматизированная система GMT–Auto состоит из трех основных блоков: 1) автоматизированное введение в компьютер изображений геолого-геофизических карт и построение их цифровых моделей, которые являются входными данными для решения прямой или обратной задачи; 2) решения прямой задачи гравиметрии, магнитометрии и геотермии для трехмерных неоднородных пластов, которые аппроксимируются совокупностью неоднородных вертикальных призм с произвольно расположенными верхним и нижним основаниями; 3) представление результатов решения прямых задач в графическом виде.

Использование созданной автоматизированной системы существенно облегчает и ускоряет процесс интерпретации геофизических полей и значительно увеличивает достоверность истолкования объемной геологической среды. Автоматизированная система (GMT–Auto) нашла широкое применение при решении практических задач, связанных с изучением сложного строения различных геологических структур по геофизическим данным. С её помощью построены, в частности, новые трехмерные плотностного модели Днепровско-Донецкой впадины и складчатого пояса Донбасса, Припятского прогиба, Карпато-Паннонского региона, Черноморской впадины, северо-западного шельфа Черного моря, Нидерландской прибрежной зоны, щитов (Украинского, Балтийского) и Воронежского кристаллического массива. Построенные модели реальных геологических структур могут быть использованы при решении практических задач геологии, тектоники, а также при поисках и разведке полезных ископаемых.

Ключевые слова: математическое обеспечение, программное обеспечение, автоматизированная система, 3D моделирование потенциальных полей, сканирование.

ANNOTATION

Legostaieva O.V. Mathematical and software packages for an automated 3D interpreting data of potential fields (GMT–Auto). – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Thesis for the scientific degree of doctor of physical and mathematical sciences, specialty 04.00.22 – geophysics (103–Earth Sciences). – Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Three-dimensional modelling of geological structures has been long ago one of the most powerful tool for numerical interpretation of gravity, magnetic and thermal fields, which are widely used in geophysics. The success of interpreting geological and geophysical data largely depends on technological computer programmes, which can be used to quickly and clearly obtain information on the environment, to combine it with other data, and to export to available software products, and so on. A new package of automated interpretation of gravity, magnetic and thermal fields (GMT–Auto) has been developed, which allows developing three-dimensional

models with a continuous distribution of physical parameters in them for given fields. This makes it possible to analyze the fields in more detail and more fully, because the fitting of the calculated field to the model largely depends on the degree of approximation of the environment in the model.

The GMT–Auto package consists of following products.

Geophys0 software package is targeted for automated and interactive processing of b/w images of geological and geophysical data, mainly information on isolines and their discontinuity of the first kind (faults, breaks, etc.). Earlier, such tasks were performed using the *MAP* program, which was also developed at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, but it allowed processing maps containing only isolines.

The SpaceMap software package is specially designed for calculating geophysical fields of crystalline shields, because it is necessary to put into the computer maps of isolines but objects (areas).

Isohypse software package is developed integrate previous software products, such as *MAP* and *Geophys0*. The main its advantage is the ability to process both monochrome (b/w) and colour (original maps) images in rectangular or geographic coordinate systems. The package is utilized for the digitization of geological and geophysical objects, represented by isolines and discontinuities, i.e., is by functions with discontinuities of the first kind.

Profile software package was developed for solving direct problems of gravimetry, magnetometry and geothermic.

Magnetic program was worked out for solving direct problems of magnetometry.

The *Profile* software package is capable to change physical parameters within the prisms by the linear law along the horizontal coordinates on the upper and lower bases or linearly along any vertical line so that physical parameter adopts given value at prism vertexes.

In solving direct problems, horizontally-layered geological features are approximated by a set of inhomogeneous, arbitrarily truncated vertical rectangular prisms. In this case, the contact surfaces are formed by a set of “tiles”, which are bases of prisms.

Each program allows us to solve a problem for many-layered models (from 1 to 9 layers). The input information is individually sent for each layer. It depends on chosen task and presents description of the roof and base of each layer, as well as information about the distribution of the physical parameter on them in the form of maps or values.

The input data for the 3D Magnetic Calculation program is the relief of the upper and lower surface of a layer, which can be obtained as a file or number in kilometers where I_x, I_y, I_z are components of the magnetization vector. In consequence, the program produces files of the output result, namely: the files of the components X, Y, Z for the total vector of the magnetic field intensity and T —the total value of the modulus of the vector of the magnetic field intensity.

The input data for the 3D Termic Calculation program is the relief of the upper and lower surface of the layer that can be specified as a file or number in kilometers and the heat generation density Q , the thermal conductivity. As a result, the program generates output files, namely: files Temperature T and Heat flux q .

The result of the automated package is a file that contains information about the coordinates of each point on the X - and Y - axes and the value of the field calculated on them. In solving the problem of magnetometry, the source file also contains information about the components of the magnetic field vector and its total value at each point.

The package of automated interpretation of gravity, magnetic and thermal fields (GMT–Auto) allows us to develop three-dimensional models of a continuous distribution of physical parameters in them for given fields. This makes it possible to analyze the fields in more detail and more fully, because fitting the calculated field to the model largely depends on the degree of approximation of the environment in the model.

The automated system (GMT–Auto) is widely used in solving practical tasks in studies of the complex structure of different geological features utilizing geophysical data. Its applying made it possible to develop new three-dimensional density models, in particular, for the Dnieper-Donetsk basin, Donbas fold belt, the NW Black Sea shelf, the Dutch coastal zone, the shields (Ukrainian, Baltic) and the Voronezh crystalline massif. These models of real geological structures are used in solving practical tasks of geology, tectonics, including the search and exploration of mineral resources.

It is focused on practical using by scientific and industrial organizations. Such studies were performed at the Institute of Geophysics of NASU (Kyiv), the Geophysical Department of the Institute of Earth Sciences of the Slovak Academy of Sciences (Bratislava), the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences (Warsaw), the Institute of Geophysics of the Vietnamese Academy of Sciences and Technology (Hanoi), Geophysical Institute of the Bulgarian Academy of Sciences (Sofia), Free University (Netherlands, Amsterdam).

Keywords: mathematical software, software, automated system, 3D modeling of potential fields, scanning.