

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

**САВЧЕНКО ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЇВНА**

УДК 004.42:550.83

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КІЛЬКІСНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ  
ДАНИХ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ПОЛІВ**

04.00.22 – геофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник** – доктор фізико-математичних наук,  
професор, академік НАН України  
**Старостенко Віталій Іванович**,  
директор Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна  
НАН України

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Міненко Павло Олександрович**,  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»  
професор кафедри інформатики та прикладної математики

кандидат фізико-математичних наук  
**Федченко Тетяна Олександрівна**,  
Інститут геотехнологій «ІНГЕОТЕХ ЛТД»,  
директор

Захист відбудеться « 13 » жовтня 2016 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України за адресою:

03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32

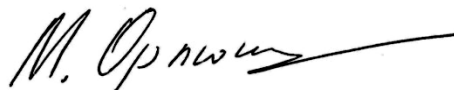
Факс: (044) 450–25-20

E-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

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

Автореферат розісланий « 9 » вересня 2016 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
доктор геологічних наук



М. І. Орлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність досліджень.** Тривимірне чисельне моделювання геологічних структур давно стало одним із потужних способів кількісної інтерпретації даних гравіметрії, магнітометрії та теплового поля.

Успіх процесу інтерпретації геолого-геофізичних даних в істотній мірі залежить від технологічності комп'ютерних програм, за допомогою яких можна швидко і чітко представити інформацію про середовище, комбінувати її з іншими даними, експортувати в існуючі програмні продукти і т. п. Важливо, щоб вони полегшували введення в комп'ютер необхідної інформації для вирішення різних задач, що виникають в науках про Землю, а також полегшували візуалізацію отриманих результатів у різних проекціях. Для цих цілей існують добре відомі програмні продукти, такі як MapInfo ([www.mapinfo.com](http://www.mapinfo.com)), CorelDraw ([www.coreldraw.com](http://www.coreldraw.com)), Surfer і Voxler ([www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)), ArcGis ([www.esri.com](http://www.esri.com)), Oasis Montaj ([www.geosoft.com](http://www.geosoft.com)) та ін., а також створюються нові спеціалізовані програми, орієнтовані на специфіку задач геофізики (роботи О. В. Петрова, D. Gao, С. Г. Бичкова, А. І. Якимчика, В. І. Аронова, О. С. Долгаля та ін.).

Вдосконалення відомих і створення технологічних і зручних нових автоматизованих систем інтерпретації даних потенціальних полів – сучасна актуальна задача геофізики, оскільки дозволяє більш повно і об'єктивно, а також технічно простіше, виконувати кількісну інтерпретацію геолого-геофізичних даних шляхом побудови тривимірних чисельних моделей досліджуваних геологічних структур.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася згідно з науковими темами Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України: «Комплексне геолого-геофізичне вивчення глибинної будови південно-західної окраїни Східно-Європейської платформи (СЄП) з метою розширення мінерально-сировинної бази України» (2007–2010), № р/н 0106U000911; «Глибинна будова і геодинаміка наскрізних широтних зон розломів для оцінки перспектив пошуку корисних копалин» (2007–2011) № р/н 0107U002193; «Особливості будови літосфери і характеру сейсмічності великих геологічних провінцій південно-західного сегменту СЄП: Українського щита, Воронежського кристалічного масиву і розділяючої їх Дніпровсько-Донецької западини» (2010–2011) № р/н 0110U004270; «Побудова тривимірної геофізичної моделі літосфери шельфу, континентального схилу і глибоководної западини Чорного моря з метою прогнозу в українському секторі площ, перспективних на пошуки нафти і газу» (договір між Національною акціонерною компанією «Нафтогаз України» та Товариством з обмеженою відповідальністю «Володар» № 34-12 від 20 вересня 2011 р.); «Прогнозування нафтогазоперспективних структур фундаменту Дніпровсько-Донецької западини за даними тривимірного геофізичного моделювання геологічного середовища» (договір між Національною акціонерною компанією «Нафтогаз України» та Товариством з обмеженою відповідальністю «Володар» № 40-30 від 3 травня 2012 р.); «Побудова тривимірної геолого-геофізичної моделі південної окраїни СЄП та її обрамлення з метою розширення мінерально-сировинної бази України» (2011–2015) № р/н 0111U000236; «Глибинна

будова і геодинамічний розвиток Інгульського мегаблока Українського щита у зв'язку з пошуками стратегічних видів корисних копалин» (2013-2015) № р/н 0113U002502; «Комплексне геофізичне вивчення глибинної будови, складу та еволюції земної кори з метою визначення вуглеводного ресурсного потенціалу Азово-Чорноморського регіону» (2013-2015) № р/н 0113U004152; «Геодинамічний розвиток літосфери України та формування і розміщення родовищ корисних копалин» (2012–2016) № р/н 0112U003044.

**Мета та задачі дослідження.** Мета – створення нової автоматизованої системи кількісної інтерпретації даних потенціальних полів, її практична апробація на прикладі вивчення основних геологічних структур на території України, а також деяких структур близького і далекого зарубіжжя.

Основні задачі досліджень:

1) побудова алгоритмів і програм автоматизованого введення в комп'ютер геофізичної і геологічної інформації, представленої у вигляді існуючих карт (без їх попередньої ручної обробки) і побудова на їх основі початкового наближення тривимірної геолого-геофізичної моделі досліджуваної структури;

2) розв'язання прямої задачі магніторозвідки для всіх компонент магнітного поля для анізотропних монокліналей і складчастих структур;

3) вивчення можливості відновлення гармонічних функцій за магнітним полем  $\Delta T$  і встановлення зв'язку цієї функції з функцією  $\Delta S$  В. М. Страхова;

4) приклади практичного використання автоматизованої системи при вивченні Інгульського мегаблока Українського щита, центральної частини Карельського кратону, Турчанської западини (західні Карпати) та застосування функції  $\Delta S$  В. М. Страхова при інтерпретації магнітного поля Криворізької структури.

**Об'єкт досліджень** – питання теорії та методики створення і використання алгоритмів і програм автоматизованої системи.

**Предмет досліджень** – реальні геологічні об'єкти території України та зарубіжжя.

**Методи досліджень.**

1) теорія алгоритмів і програм автоматизованого введення в комп'ютер зображень геофізичної і геологічної інформації у вигляді карт та її обробка;

2) теорія, алгоритми і програми розв'язування прямих задач магнітометрії для всіх компонент магнітного поля для монокліналей і складчастих структур;

3) відновлення гармонічних функцій по магнітному полю  $\Delta T$  і зв'язок цієї функції з функцією  $\Delta S$  В. М. Страхова;

4) апробація фрагментів створюваної автоматизованої системи на модельних тестових прикладах;

5) розробка раціональної методики практичного застосування автоматизованої системи при побудові геолого-геофізичних моделей реальних геологічних структур.

**Наукова новизна отриманих результатів:** Створена автоматизована система інтерпретації даних потенціальних полів є новою і оригінальною. З її допомогою:

1) автоматизовано вводяться в комп'ютер зображення реальних геологічних і геофізичних карт без попередньої ручної обробки з метою отримання їх в чисельному вигляді;

2) за чисельними моделями вхідних карт в інтерактивному режимі будуються початкові наближення тривимірних геолого-геофізичних моделей досліджуваних геологічних структур;

3) реалізується методика побудови магнітних моделей геологічних структур з урахуванням закономірностей, встановлених В. М. Завойським про зв'язок магнітної анізотропії зі структурою порід;

4) відновлено гармонічну функцію за магнітним полем  $\Delta T$ , а також встановлено зв'язок цієї функції з функцією  $\Delta S$  В. М. Страхова;

5) побудована тривимірна густинна модель земної кори Інгульського мегаблока Українського щита, тривимірна густинна і магнітна моделі центральної частини Карельського кратона, а також густинна модель осадової товщі Турчанської западини (західні Карпати);

6) розглянуто застосування функції  $\Delta S$  В. М. Страхова при інтерпретації магнітного поля Криворізької структури.

**Достовірність отриманих результатів** забезпечується застосуванням математично чітких рішень; підтвердженням теоретичних положень результатами експериментальних розрахунків на тестових прикладах; чисельним гравітаційним та магнітним моделюванням геологічних структур при інтерпретації результатів геофізичних спостережень.

**Практичне значення отриманих результатів.** Створена система орієнтована на практичне використання як в наукових, так і у виробничих геофізичних організаціях.

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

**Особистий внесок здобувача.** Автор є активним співавтором алгоритмів і програм введення в комп'ютер зображень карт в створеній автоматизованій системі, а також побудованих геолого-геофізичних моделей реальних геологічних структур. Крім того, автором:

- вирішена пряма задача магнітометрії для всіх компонент магнітного поля для довільно розташованого в просторі плоского трикутника [5];
- вивчено зв'язок між магнітним полем  $\Delta T$  і функцією  $\Delta S$  В. М. Страхова [10];
- розроблена методика практичного використання функції  $\Delta S$  при інтерпретації спостереженого магнітного поля  $\Delta T$  [10];
- встановлені зручні і економічні прийоми автоматичного включення в автоматизовану систему відомих програм, створених раніше (вирішення прямої задачі гравіметрії та стаціонарної задачі геотермії) [7, 14, 18, 19];
- побудовані тривимірні густинна і магнітна моделі літосфери центральної частини Карельського кратона [3, 17].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертації доповідались та пройшли апробацію на: 35-й сесії Міжнародного семінару ім. Д. Г. Успенського «Питання теорії і практики геологічної інтерпретації гравітаційних, магнітних і електричних полів» (Ухта, Росія, 2008); 14-й Міжнародній конференції «Зв'язок поверхневих структур земної кори з глибинними» (Петрозаводськ, Росія, 2008); 1-й Міжнародній конференції «Актуальні проблеми електромагнітних зондувальних систем» (Київ, Україна,

2009); XVI Міжнародній конференції «Структура, властивості, динаміка і мінералогія літосфери Східно-Європейської платформи» (Воронеж, Росія, 2010); An International conference on Geodynamical phenomena: from observations and experiments to theory and modelling (Kiev, Ukraine, 2010); International workshop «Artificial intelligence in the Earth's magnetic field study. Intermagnet Russian segment» (Uglich, Russia, 2011); 39-й сесії Міжнародного семінару ім. Д. Г. Успенського «Питання теорії і практики геологічної інтерпретації гравітаційних, магнітних і електричних полів» (Воронеж, Росія, 2012); 40-й сесії Міжнародного семінару ім. Д. Г. Успенського «Питання теорії і практики геологічної інтерпретації гравітаційних, магнітних і електричних полів» (Москва, Росія, 2013); Всеросійській конференції, присвяченій 100-річчю з дня народження академіка М. М. Пузирьова «Геофізичні методи дослідження земної кори» (Новосибірськ, Росія, 2014); Bulgarian geological society, National Conference with International Participation «Geosciences 2014» (Sofia, Bulgaria, 2014); 7<sup>th</sup> BgGS National Conference With International Participation «GEOPHYSICS 2015» (Sofia, Bulgaria, 2015).

**Публікації.** Основні результати викладені в 15 статтях у фахових журналах, у 12 тезах та 3 монографіях у співавторстві.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури, який включає 147 публікації. Робота викладена на 147 сторінках і містить 58 рисунків.

Робота виконана в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України під керівництвом академіка НАНУ В. І. Старостенко, який має великий вплив на наукову діяльність автора, і якому дисертант щиро вдячна. Здобувач висловлює величезну подяку провідному науковому співробітнику відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії І. Б. Макаренко за підтримку, цінні поради і допомогу при роботі над дисертацією. Автор також глибоко вдячна провідному науковому співробітникові відділу геомагнетизму І. К. Пашкевич за спільні дослідження та обговорення питань при написанні даної роботи. Протягом усього дослідного періоду автор співпрацювала, користувалася порадами і підтримкою старших наукових співробітників відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії О. В. Легостаєвої та П. Я. Купрієнко. Для автора було дуже корисно співпрацювати з провідним інженером-програмістом А. В. Шарипановим (Інститут кібернетики НАНУ), якому також висловлюється подяка.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

### **Розділ 1. Автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт.**

У даному розділі розглянуто принципи роботи створених програмних продуктів *SpaceMap* та *Isohypse*, які призначені для введення в комп'ютер зображень геологічних і геофізичних карт і отримання їх у чисельному вигляді.

*1.1. Програма SpaceMap* створена для використання при виконанні модельних розрахунків для консолідованої кори, на кристалічних щитах, оскільки в цьому випадку в комп'ютер необхідно вводити зображення карт, основним змістом яких є не ізолінії, а тіла (області) [Старостенко и др., 2011].

Процес обробки зображення полягає в знаходженні цих областей [Шлезингер, 1989], присвоєнні кожній з них деякого числового значення геолого-геофізичного параметру (індексу), накладання сітки на побудоване зображення і визначення індексів в її вузлах.

В результаті роботи програми формується вихідний файл, який містить вихідні дані, необхідні для розв'язування задач геофізики, а також при роботі з найсучаснішими комп'ютерними системами, які активно застосовуються при інтерпретації геолого-геофізичних даних.

*1.2. Програмний комплекс Isohypse*, призначений для введення в комп'ютер як монохромних (чорно-білих), так і кольорових зображень геолого-геофізичних об'єктів, представлених ізолініями і розломами (функції з розривами першого роду) в прямокутній або географічній системах координат [Старостенко и др., 2016].

Введення об'єктів (розломів або ізоліній) виконується однаково при роботі в різних системах координат за допомогою кривих Безьє [Роджерс и др., 2001], використання яких дозволяє простіше імітувати поверхні геофізичних об'єктів.

Визначення значення геолого-геофізичного параметра в кожному вузлі заданої сітки виконується різними методами в залежності від розташування вузла відносно інших об'єктів та рамки зображення.

В програмному комплексі Isohypse реалізовано ряд можливостей, які обумовлені специфічними вимогами, що пред'являються до обробки деяких зображень геофізичних об'єктів. Вперше введено поняття ізолінії спеціального типу. Такою може бути будь-яка, за якою немає інших ізоліній та її кінці лежать на рамці. Передбачена можливість з уже створеного цифрового опису зображення вирізати і зберегти дані в будь-якій прямокутній області, а також отримати інформацію вздовж обраної лінії або послідовності прямих ліній для подальшого використання при побудові двовимірних розрізів.

Результатом роботи програми є файл, який містить таку інформацію: кількість точок по осях  $X$  і  $Y$ , крок сітки, значення координат кожного її вузла і величина розрахованого в ньому фізичного параметра ( $Z$ ).

## **Розділ 2. Обчислення магнітного поля для монокліналей і складчастих структур.**

Для кількісної інтерпретації спостереженого поля, а також його складових, необхідно мати формули, які дають рішення прямої задачі магнітометрії по осях координат  $x, y, z$  для компонент аномального магнітного поля  $T_a$ , тобто величин  $X_a, Y_a, Z_a$ . В якості тіла, набором яких зручно апроксимувати магнітну модель певної геологічної структури, виберемо довільний анізотропний багатогранник.

*Постановка задачі.* Нехай в обраній системі координат  $x, y, z$  – координати точок спостереження, в яких обчислюється магнітне поле  $T_{розр.}$ ;  $\xi, \eta, \zeta$  – координати точок тривимірного тіла об'ємом  $W$ , що створює магнітне поле  $T_{розр.}$ .

Тут  $(.,.)$  – символ скалярного добутку векторів;  $r^2 = (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2$  – квадрат відстані між точками  $(x, y, z)$  і  $(\xi, \eta, \zeta)$ ;

$$I(\xi, \eta, \zeta) = I_\xi(\xi, \eta, \zeta)i + I_\eta(\xi, \eta, \zeta)j + I_\zeta(\xi, \eta, \zeta)k, \quad (2.1)$$

де  $I(\xi, \eta, \zeta)$  - вектор намагніченості тіла.

Вираз для магнітного потенціалу, обумовленого тілом  $W$ , має вигляд:

$$U(x, y, z) = - \iint_S \left( \frac{\mathbf{I}}{r}, \mathbf{n} \right) dS + \iiint_W \left( \frac{1}{r} \operatorname{div}_{\xi, \eta, \zeta} \mathbf{I} \right) d\xi d\eta d\zeta, \quad (2.2)$$

де  $S$  – поверхня тіла  $W$ ;  $\mathbf{n}$  – орт зовнішньої нормалі до елемента поверхні  $S$ .

Очевидно, що

$$\rho = n_i I_i \quad i = \xi, \eta, \zeta, \quad (2.3)$$

густина поверхневих, а

$$\sigma = \operatorname{div}_{\xi, \eta, \zeta} \mathbf{I} = I_{i,i}, \quad i = \xi, \eta, \zeta, \quad (2.4)$$

густина об'ємних мас відповідно. Сумою потенціалів цих мас, як це впливає з виразу (2.2), в загальному випадку визначається магнітний потенціал намагніченого тіла  $W$ .

Якщо всередині тіла  $W$  вектор інтенсивності намагніченості  $\mathbf{I}$  є сталою величиною, що властиво для ізотропних і однорідних анізотропних тіл, то магнітний потенціал, як легко бачити з (2.2), визначається тільки поверхневими масами:

$$U(x, y, z) = - \iint_S \left( \frac{\mathbf{I}}{r}, \mathbf{n} \right) dS = - \left( \mathbf{I}, \iint_S \frac{\mathbf{n}}{r} dS \right). \quad (2.5)$$

Прийmemo, що тіло  $W$  – монокліналь. Як впливає з загальної теорії зв'язку магнітної анізотропії зі структурою порід, в основі якої закономірності, встановлені В. М. Завойським, густина об'ємних магнітних мас монокліналі, шаруватих і складчастих порід перетворюється в нуль. Тому їх магнітне поле створюється тільки поверхневими масами. Саме для цього окремого, але дуже важливого випадку розподілу анізотропних магнітних мас в таких породах розглянуті всі рішення. Вони збігаються з загальним випадком для однорідних анізотропних тіл. Нехай  $W$  – деякий багатогранник, поверхня  $S$  якого складається з  $Q$  граней  $S_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , які є плоскими багатокутниками. Тоді формулу (2.5) можна переписати наступним чином:

$$U(x, y, z) = - \sum_{q=1}^Q \left( \mathbf{I}, \mathbf{n}_q \right) \iint_{S_q} \frac{dS_q}{r} = - \sum_{q=1}^Q \left[ (I_\xi n_{\xi q} + I_\eta n_{\eta q} + I_\zeta n_{\zeta q}) \iint_{S_q} \frac{dS_q}{r} \right], \quad (2.6)$$

де  $n_{iq}$ ,  $i = \xi, \eta, \zeta$  – складові орта зовнішньої нормалі до елемента поверхні  $dS_q$ .

Диференціюючи вираз (2.6) по змінним  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , отримаємо формули для обчислення складових повного вектора напруженості магнітного поля  $\Gamma_{\text{розр.}}$ , обумовленого анізотропним, однорідним многогранником  $W$  з поверхнею  $S_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ :

$$X(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial x} = - \sum_{q=1}^Q \left[ (I_i n_{iq}) \iint_{S_q} \frac{(\xi - x)}{r^3} dS_q \right], \quad (2.7)$$

$$Y(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial y} = - \sum_{q=1}^Q \left[ (I_i n_{iq}) \iint_{S_q} \frac{(\eta - y)}{r^3} dS_q \right], \quad (2.8)$$



$$Z(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = - \sum_{q=1}^Q \left[ (I_i n_{iq}) \iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q \right] \quad (2.9)$$

де  $(I_i n_{iq}), i = \xi, \eta, \zeta$ , – поверхнева густина магнітних мас (2.3) на грані  $q$ , записана у відповідності до правила додавання А. Ейнштейна.

Будемо вважати, що гірські породи і руди – «ідеальні феромагнетики», тому можемо прийняти, що справедлива наближена рівність:

$$I_i = \chi_{ij} T_j, \quad i, j = \xi, \eta, \zeta, \quad (2.10)$$

що спрощує рішення задачі [Блох, 2009].

### Розділ 3. Аналітичні вирази для обчислення компонент магнітного поля від довільно розташованого плоского трикутника.

1. Поверхню багатогранника зручно представити набором плоских трикутників (багатокутних пластин). Цей простий і гнучкий прийом використовувався в геофізиці неодноразово [Bott, 1963; Завойский, 1978; Страхов, Лапина, 1983; Блох, 2009; Пятаков, Исаев, 1995; Коваленко-Завойський, Іващенко, 2006].

Спочатку виконаємо розрахунки для вертикальної складової магнітного поля  $Z$ , що описується формулою (2.9), оскільки ця складова застосовується на практиці найчастіше. Відповідні алгоритми для обчислення горизонтальних складових поля  $X$  і  $Y$  будуються аналогічно (зазвичай в літературі ці рішення не розглядаються).

2. З виразу (2.9) очевидно, що ключовим моментом рішення прямої задачі магнітометрії для  $Z$  є розрахунок поверхневих інтегралів

$$F = \iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q, \quad (3.1)$$

де  $S_q$  – плоский довільно орієнтований трикутник, заданий координатами вершин  $P_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), P_2(\xi_2, \eta_2, \zeta_2), P_3(\xi_3, \eta_3, \zeta_3)$ . Прийmemo, що ці вершини співпадають з трьома точками, які одночасно є вузлами апроксимаційної моделі, і нехай  $\mathbf{n} = \{n_\xi, n_\eta, n_\zeta\}$  – орт зовнішньої (по відношенню до багатогранника) нормалі до площини трикутника.

З аналізу виразів (2.9) і (3.1) випливає, що алгоритм обчислення інтеграла зручно розділити на дві частини. У першій – власне обчислення поверхневого інтегралу першого роду, тобто без урахування вибору певної орієнтації на площині трикутника, у другій – обчислення складових зовнішнього орта  $\mathbf{n}$ .

3. Рівняння межі (площині) в канонічному вигляді:

$$A\xi + B\eta + C\zeta + D = 0, \quad (3.2)$$

причому в конкретному випадку значення коефіцієнтів рівняння (3.2) визначаються рівностями

$$\left. \begin{aligned} A &= (\eta_2 - \eta_1)(\zeta_3 - \zeta_1) - (\eta_3 - \eta_1)(\zeta_2 - \zeta_1), \\ B &= (\xi_3 - \xi_1)(\zeta_2 - \zeta_1) - (\xi_2 - \xi_1)(\zeta_3 - \zeta_1), \\ C &= (\xi_2 - \xi_1)(\eta_3 - \eta_1) - (\xi_3 - \xi_1)(\eta_2 - \eta_1) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

та

$$D = -(\xi_1 A + \eta_1 B + \zeta_1 C). \quad (3.4)$$

Позначимо також

$$M = (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}. \quad (3.5)$$

Тоді справедливі рівності:

$$\alpha_{\xi_3} = \frac{A}{M}, \alpha_{\eta_3} = \frac{B}{M}, \alpha_{\zeta_3} = \frac{C}{M}$$

4. *Перша частина алгоритму. Обчислення поверхневого інтеграла.* У відповідності з властивостями поверхневого інтеграла його можна виразити через подвійні наступним чином:

$$\iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q = \frac{1}{|\cos \gamma|} \iint_{S_{q_{\xi\eta}}} \frac{(\zeta(\xi, \eta) - z)}{r^3} d\xi d\eta, \quad (3.6)$$

$$\iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q = \frac{1}{|\cos \alpha|} \iint_{S_{q_{\eta\zeta}}} \frac{(\zeta - z)}{r^3} d\eta d\zeta, \quad (3.7)$$

$$\iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q = \frac{1}{|\cos \beta|} \iint_{S_{q_{\xi\zeta}}} \frac{(\zeta - z)}{r^3} d\xi d\zeta. \quad (3.8)$$

З (3.2) випливає, що рівняння площини трикутника для (3.6) – (3.8) необхідно представити наступним чином:

$$\zeta = \zeta(\xi, \eta) = -\frac{1}{C}(A\xi + B\eta + D), \quad (3.9)$$

для інтегралу (3.6);

$$\xi = \xi(\eta, \zeta) = -\frac{1}{A}(B\eta + C\zeta + D), \quad (3.10)$$

для інтегралу (3.7) і

$$\eta = \eta(\xi, \zeta) = -\frac{1}{B}(A\xi + C\zeta + D) \quad (3.11)$$

для інтегралу (3.8).

У співвідношеннях (3.6) – (3.8) величини  $\alpha, \beta, \gamma$  – кути між нормаллю  $\mathbf{n}'$  до площини трикутника  $S_q$  і координатними осями  $0\xi, 0\zeta, 0\eta$  відповідно, причому,

$$\cos \alpha = \frac{A}{M}, \cos \beta = \frac{B}{M}, \cos \gamma = \frac{C}{M}; \quad (3.12)$$

$S_{q_{\xi\eta}}, S_{q_{\eta\zeta}}, S_{q_{\xi\zeta}}$  – проекції трикутника  $S_q$  на координатні площини. Підкреслимо, що нормаль  $\mathbf{n}'$  може бути як зовнішньою по відношенню до многогранника (в цьому випадку  $\mathbf{n}' = \mathbf{n}$ ), так і внутрішньою (тоді  $\mathbf{n}' = -\mathbf{n}$ ), про що свідчить друга частина алгоритму).

В правих частинах (3.6) – (3.8) кожен з подвійних інтегралів зведемо до криволінійних. Останні беруться по замкненому контуру  $L$ , який обмежує проекцію трикутника  $S_q$  (тобто  $S_{q_{\xi\eta}}, S_{q_{\eta\zeta}}, S_{q_{\xi\zeta}}$ ) на відповідну координатну поверхню.

При проектуванні трикутника  $S_q$  на площину  $xOz$  мають місце співвідношення:

$$\iint_{S_{q_{\xi\zeta}}} \frac{\partial R(\xi, \zeta)}{\partial \xi} d\zeta d\xi = - \int_L R(\xi(\zeta), \zeta) d\zeta, \quad (3.13)$$

$$\iint_{S_q} \frac{\partial P(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} d\zeta d\xi = \int_L P(\xi, \zeta(\xi)) d\xi; \quad (3.14)$$

При проектуванні  $S_q$  на площину  $xOy$  маємо:

$$\iint_{S_q} \frac{\partial Q(\xi, \eta)}{\partial \xi} d\xi d\eta = \int_L Q(\xi(\eta), \eta) d\eta, \quad (3.15)$$

$$\iint_{S_q} \frac{\partial P(\xi, \eta)}{\partial \eta} d\xi d\eta = - \int_L P(\xi, \eta(\xi)) d\xi. \quad (3.16)$$

При проектуванні трикутника  $S_q$  на площину  $yOz$ :

$$\iint_{S_q} \frac{\partial R(\eta, \zeta)}{\partial \eta} d\eta d\zeta = \int_L R(\eta(\zeta), \zeta) d\zeta \quad (3.17)$$

$$\iint_{S_q} \frac{\partial Q(\eta, \zeta)}{\partial \zeta} d\eta d\zeta = - \int_L Q(\zeta(\eta), \eta) d\eta. \quad (3.18)$$

В формулах (3.13) – (3.18) функції  $P(\xi, \eta, \zeta)$ ,  $Q(\xi, \eta, \zeta)$  і  $R(\xi, \eta, \zeta)$  неперервні разом зі своїми частинними похідними в областях, які містять всередині себе проекції трикутника  $S_q$  на відповідні координатні площини;  $L$  – кусково-гладкий контур, що охоплює проекції трикутника  $S_q$  на координатних площинах.

*Інтегрування по контуру  $L$ .* Очевидно, що з усіх перерахованих вище можливостей обчислення інтеграла  $F$  обирати з (3.6) – (3.8) варто те співвідношення, в якому модуль косинуса деякого кута ( $\alpha$ ,  $\beta$  або  $\gamma$ ) приймає найбільше значення. Нехай таким кутом буде  $\gamma$ . Обчислення інтеграла (3.6) зводиться до виразу:

$$F = \iint_{S_q} \frac{(\zeta - z)}{r^3} dS_q = - \frac{1}{|\cos \gamma|} \sum_{i=1}^3 I'_i, \quad (3.19)$$

де інтеграл  $I'_i$  можна представити в вигляді:

$$I'_i = \int_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \frac{(p_2 \xi^2 + q_2 \xi + l_2) d\xi}{(p \xi^2 + q \xi + l) \sqrt{p_1 \xi^2 + q_1 \xi + l_1}} \quad (3.20)$$

Значення відповідних коефіцієнтів вписувати не будемо.

В результаті подальших перетворень інтеграл  $I'_i$  зводиться до інтегралу Кравцова [Кравцов, 1978; Старостенко, 1998] і до ряду табличних інтегралів, тобто  $I'_i$  можна обчислити аналітично. Однак це призводить до громіздких виразів. Тому інтеграл  $I'_i$  доцільно обчислювати чисельно за допомогою квадратурного процесу, в основі якого – квадратурні формули Гаусса-Лежандра [Старостенко, Манукян, 1986].

5. Друга частина алгоритму. Обчислення складових зовнішнього орта  $\mathbf{n}$ . Як впливає із співвідношень (3.12), координати одиничного вектора нормалі до площини трикутника задаються співвідношеннями

$$\frac{A}{M}, \quad \frac{B}{M}, \quad \frac{C}{M} \quad (3.21)$$

або такими самими, але зі знаком «мінус». Питання зводиться до визначення напрямку вектора, який буде зовнішнім по відношенню до багатогранника  $W$ .

Нехай деяка точка  $M^*(\xi^*, \eta^*, \zeta^*)$  – внутрішня. Тоді очевидно, що вектор з координатами  $(\xi_1 - \xi^*, \eta_1 - \eta^*, \zeta_1 - \zeta^*)$  утворює гострий кут  $\nu$  з ортом зовнішньої нормалі, і, відповідно, має виконуватись умова  $\cos \nu > 0$ .

Отже, якщо виконується умова

$$A(\xi_1 - \xi^*) + B(\eta_1 - \eta^*) + C(\zeta_1 - \zeta^*) > 0, \quad (3.22)$$

то координати вектора  $n'$  необхідно обирати у відповідності зі співвідношеннями (3.21), тобто в цьому випадку  $n' = n$ . Якщо умова (3.22) не виконується, то координати  $n$  необхідно обирати протилежними до (3.21), тобто  $n' = -n$ .

Вибір довільної внутрішньої точки в тілі можна здійснити за допомогою евристичного алгоритму наведеного у дисертації.

Таким чином, за допомогою формули (2.9), а також конкретних виразів з співвідношень (3.6) – (3.8) та (3.13) – (3.18), інтегрування по поверхні багатогранника  $W$  зводиться до інтегрування по його ребрах. При цьому повинна враховуватися, у відповідності з другою частиною алгоритму, орієнтація зовнішньої нормалі  $n$  до кожного з трикутників  $S_q, q = \overline{1, Q}$ , для чого використовуються співвідношення (3.21) і (3.22).

Аналогічно отримані відповідні формули для обчислення горизонтальних складових магнітного поля  $X$  і  $Y$ .

#### **Розділ 4. Відновлення гармонічних функцій по магнітному полю $\Delta T$ і зв'язок цієї функції з функцією $\Delta S$ В. М. Страхова.**

Величину  $\Delta T_0$ , як проекцію вектора напруженості аномального магнітного поля на деякий постійний напрямок (у даному випадку – напрямок вектора нормального поля), можна розглядати як функцію гармонічну. Суворі умови гармонічності функції  $\Delta T_0$  вказав В. М. Страхов. Його основну рівність легко отримати з формули

$$\Delta T \approx \Delta T_0 = \frac{\mathbf{T}_0 \cdot \mathbf{T}_a}{T_0}, \quad (4.1)$$

якщо в неї підставити значення векторів  $\mathbf{T}_a = X_a i + Y_a j + Z_a k$  і  $\mathbf{T}_0 = X_0 i + Y_0 j + Z_0 k$ .

Це дає:

$$\Delta T_0 = t_1 X_a + t_2 Y_a + t_3 Z_a, \quad (4.2)$$

де

$$t_1 = \frac{X_0}{T_0}, \quad t_2 = \frac{Y_0}{T_0}, \quad t_3 = \frac{Z_0}{T_0}. \quad (4.3)$$

Якщо прийняти, що величини  $t_1, t_2$  і  $t_3$  постійні і виконується умова

$$\frac{T_a}{T_0} \ll 1, \quad (4.4)$$

то

$$\nabla^2(\Delta T_0) = 0. \quad (4.5)$$

Слідуючи В. М. Страхову [Страхов, 1993], функцію  $\Delta T_0$  будемо називати також лінеаризованим представленням поля  $\Delta T$ , а з викладеного вище очевидні умови її гармонічності. Всі наведені міркування виправдовують в ряді випадків використання наближеної рівності  $\Delta T \approx \Delta T_0$ , якщо магнітні аномалії слабкі.

Використовуючи ідею побудов Ю. П. Тафеева, отримано його уточнену формулу [Тафеев, 1953, с. 3] і показано, що безпосередньо з неї випливає формула [Гордин и др., 2006; Тихоцкий, 2011].

Враховуючи, що аналітична теорія функції  $\Delta T$  вельми складна, В. М. Страхов запропонував нову характеристику аномального магнітного поля  $\Delta S$ , яка є квадратичною функцією від тих же компонент аномального поля та намагніченості тіл.

Основний аналітичний вираз для функції  $\Delta S$ , запропонований В. М. Страховим, наступний [Страхов, 1993]:

$$\Delta S = \frac{T^2 - T_0^2}{2T_0} \quad (4.6)$$

Підставляючи в (4.6) значення  $|\mathbf{T}_0| = T_0 = (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2)^{1/2}$  і  $|\mathbf{T}| = T = [(X_0 + X_a)^2 + (Y_0 + Y_a)^2 + (Z_0 + Z_a)^2]^{1/2}$  і враховуючи (4.2), співвідношення (4.6) перетворюється на вираз:

$$\Delta S = \Delta T_0 + \frac{T_a^2}{2T_0}. \quad (4.7)$$

Співвідношення (4.7) легко переписати таким чином:

$$\Delta S = \Delta T \left( 1 + \frac{\Delta T}{2T_0} \right). \quad (4.8)$$

Вираз (4.8) є основним для перерахунку  $\Delta T$  в  $\Delta S$ .

## Розділ 5. Приклади вирішення практичних задач.

*5.1. Тривимірна густинна модель земної кори Інгульського мегаблоку Українського щита.* Метою побудови тривимірної густинної моделі було виявлення особливостей глибинної будови різних структур Інгульського мегаблоку Українського щита. Отримані дані в подальшому можуть бути використані для розрахунку потужності умовно виділених «гранітного», «діоритового» і «базальтового» шарів, співставлення яких з загальною потужністю земної кори дозволить спрогнозувати її речовинний склад.

Методика побудови тривимірної густинної моделі включає: методичні основи, програмний комплекс для моделювання, структуру і параметризацію моделі. [Старостенко и др., 1975; Красовский, 1981; Красовский и др., 1998; Куприенко и др., 2007; Старостенко и др., 2015].

За результатами тривимірного густинного моделювання побудовано схеми розподілу густини на поверхні фундаменту, глибинах 5, 10, 20, 30 км і поверхні

Мохо, що дозволило виявити особливості розподілу густини з глибиною в Корсунь-Новомиргородському плутоні, Новоукраїнському масиві і шовних зонах.

Загалом Інгульський мегаблок чітко ділиться на західну і східну частини по шву Херсон-Смоленськ: західна частина представлена щільними породами по всьому розрізу земної кори, а східна - більш легкими.

*5.2. Тривимірна густинна і магнітна моделі літосфери Центральної частини Карельського кратона.* Задача досліджень: виявити деталі глибинної будови земної кори, уточнити склад і структуру центральної частини Карельського кратона на основі результатів відомої геолого-геофізичної інформації, доповненої новітніми даними.

Район досліджень включає прикордонну територію східної Фінляндії та західної Карелії (62.0° - 65.5° пн. ш., 28.3° – 34.0° сх. д.).

В результаті тривимірного густинного моделювання були отримані схеми розподілу густини в шарі 0–5 км, на глибині 5 км, на границі  $K_1$ , а також на поверхні шару  $K_1 - K_2$ .

Зроблено висновок про різний характер розподілу густини земної кори по площі і з глибиною в східній і західній частинах регіону, розділених шовною зоною 31 ° с. д. Східна частина представлена менш щільним розрізом кори, ніж західна. Шовна зона простежується у верхньому і середньому шарах і з заходу супроводжується зоною зниженої густини.

При побудові магнітної моделі оцінка геометрії проєкцій верхніх граней джерел регіональних магнітних аномалій (РМА) була виконана по вхідному полю  $\Delta T$  на основі вже наявних двовимірних магнітних моделей за окремими «опорними» профілями [Глубинное строение..., 2004].

Розраховане модельне магнітне поле представляє регіональну компоненту поля  $\Delta T$  і включає встановлені раніше Толвоярвинську, Ребольську і Костомукшську РМА, а також Східно-Фінляндську і Вокнаволокську РМА в прикордонній зоні Фінляндії і три слабоінтенсивні позитивні РМА в крайовій південно-західній частині району. Оцінена намагніченість глибинних магнітних джерел змінюється від 0,5 до 1,8 А/м.

*5.3. Тривимірна густинна модель осадової товщі Турчанської западини (Західні Карпати).*

Турчанська (Turčianska) западина є однією з найбільш типових внутрішніх гірських депресій Західних Карпат розташована в північній частині Словаччини, і становить близько 40 км у довжину і 10 км в ширину [Kováč et al., 2011].

Основною метою цієї роботи було отримання залишкового гравітаційного поля (stripped gravity map), яке відображає густинні неоднорідності консолідованої частини кори і може бути використане для геологічної та геофізичної інтерпретації будови і складу дотретинного фундаменту Турчанської западини.

Для осадових відкладень Турчанської западини були побудовані два варіанти тривимірної густинної моделі з лінійним градієнтом зміни густини в них з глибиною і розраховані їх гравітаційні ефекти.

При відніманні цих ефектів і регіональної складової гравітаційного поля з спостереженого поля [Bielik et al., 2007] отримані карти результуючого залишкового

поля, які були використані для геологічної та геофізичної інтерпретації будови і складу дотретинного фундаменту Турчанської западини.

Вперше побудована попередня схема будови дотретинного фундаменту, який по градієнту сили тяжіння північно-західного – південно-східного напрямку, розділений на дві частини: північну і південну. Перша характеризується герцинським кристалічним фундаментом і мезозойськими комплексами Фатричного покрову. Друга частина представлена, в основному, мезозойськими комплексами Хронічного покрову.

*5.4. Використання функції  $\Delta S$  В. М. Страхова при інтерпретації магнітного поля Криворізької структури.*

Розглянуто фрагмент аномального магнітного поля над Криворізькою структурою, де інтенсивність поля  $\Delta T$  досягає 14 000 нТл. Вхідними даними слугували матеріали масштабу 1:50 000 до карти аномального магнітного поля [Карта..., 1977], виміряного в результаті аеромагнітної зйомки на висоті 500 м. Для обраної площі розраховано функцію  $\Delta S$ .

Отримана максимальна розбіжність між функціями  $\Delta S$  і  $\Delta T$  досягає 1800 нТл в максимумі аномалії інтенсивністю 14000 нТл, при цьому в «безаномальному» полі  $\Delta T$  з інтенсивністю менше 200 нТл ця різниця близька до нуля.

Проведені розрахунки показали, що значення поля  $\Delta T$  в максимумі аномалії для моделей з глибиною до нижньої кромки 6 км і 12 км при інших, зазначених вище, параметрах відрізняються на 1200 нТл, тоді як різниця полів  $\Delta S$  і  $\Delta T$  в максимумі становить 1800 нТл. Це дозволяє зробити висновок, що використання функції  $\Delta S$  замість  $\Delta T$  раціонально для уточнення деяких деталей моделей при досить повній характеристиці інтенсивності намагніченості.

Поле  $\Delta S$  є більш контрастним, ніж вхідне поле  $\Delta T$  і може служити додатковим джерелом інформації про будову розглянутої моделі.

## ВИСНОВКИ

Викладено принцип та етапи роботи в інтерактивному режимі створених програмних комплексів SpaceMap і Isohypse, що дозволяють проводити автоматизоване введення в комп'ютер зображень геолого-геофізичних карт і отримати їх у чисельному вигляді. Застосування цих програмних продуктів дозволяє істотно скоротити час та фізичні затрати при введенні геолого-геофізичної інформації в комп'ютер, а результати їхньої роботи є вхідною інформацією для розв'язання прямих задач геофізики.

Програма SpaceMap призначена для введення інформації, представленої графічно у вигляді тіл (областей) і застосовується при виконанні досліджень консолідованої кори, а саме на щитах. Комплекс Isohypse використовується для цифрування карт, представлених ізолініями і розломами (функціями з розривами першого роду). Введення об'єктів (розломів або ізоліній) проводиться за допомогою кривих Безьє, що дозволяє простіше імітувати поверхні геофізичних об'єктів. Визначення значення  $Z(x, y)$  геолого-геофізичного параметра в кожному вузлі заданої сітки виконується різними методами: лінійної інтерполяції, екстраполяції по поліному Лагранжа, інтерполяції по кривій Безьє.

Побудовано алгоритм обчислення магнітних полів для монокліналей і складчастих структур. Основу алгоритму складають експериментально встановлені В. М. Завойським закономірності зв'язку між анізотропією магнітної сприйнятливості, тектонічною структурою і аномальним магнітним полем. Зазначені закономірності не тільки спрощують вирішення задачі, але і суттєво полегшують підготовку необхідних для цього вхідних даних польових спостережень. Отримано рішення прямої задачі магнітометрії для довільно розташованого у тривимірному просторі плоского трикутника, набором яких апроксимується поверхня розглянутих геологічних тіл.

Уточнена формула Ю. П. Тафєєва до члена другого порядку. Показано, що з цієї уточненої формули випливає співвідношення В. М. Гордіна і співавторів, дозволяє виділити гармонічний компонент функції  $\Delta T$ . Отримано лінеаризоване співвідношення функції В. М. Страхова для функції  $\Delta T$  безпосередньо з основної наближеної для  $\Delta T$  формули Ю. П. Тафєєва.

За даними тривимірного густинного моделювання в масштабі 1:200 000 встановлена особливість будови земної кори основних структур Інгульського мегаблоку Українського щита: Корсунь-Новомиргородського плутону, Новоукраїнського масиву, шовних зон і площі розвитку біотитових гнейсів.

На основі аналізу і узагальнення всієї сукупності наявної геолого-геофізичної інформації для центральної частини Карельського кратону побудовані тривимірні густинна і магнітна моделі, які дозволили оцінити особливості шарувато-блокової будови регіону і структурних співвідношень густинної і магнітної неоднорідності кори.

Вперше для осадових відкладів Турчанської западини (Західні Карпати) побудовані два варіанти тривимірної густинної моделі. При відніманні зі спостереженого поля гравітаційного ефекту густинних моделей і регіональної складової гравітаційного поля отримані карти результуючого залишкового поля, які були використані для геологічної та геофізичної інтерпретації будови і складу дотретинного фундаменту Турчанської западини.

Викладено досвід використання функції В. М. Страхова  $\Delta S$  при інтерпретації магнітної аномалії Криворізької структури.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії.*

1. Плотностная модель / [В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко**] ; под ред.: В. И. Старостенко, О. Б. Гинтов // Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. – К. : Прастыи луды, 2013. – С. 109–133.
2. Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины / [В. И. Старостенко, О. М. Русаков, И. К. Пашкевич, Р. И. Кутас, В. В. Гладун, М. И. Орлюк, И. Б. Макаренко, П. Я. Куприенко, П. Я. Максимчук, Ю. В. Козленко, М. В. Козленко, О. В. Легостаева, Т. В. Лебедь, **А. С. Савченко**]. – К. : Галактика, 2015. – 252 с.



3. Трехмерные геолого-геофизические модели земной коры центральной части Карельского кратона / [И. К. Пашкевич, **А. С. Савченко**, В. И. Старостенко, Н. В. Шаров] ; под ред.: В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров // Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия). – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2015. – С. 133–149.

*Статті в наукових виданнях.*

4. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений / В. И. Старостенко, А. Е. Лукин, В. П. Коболев, О. М. Русаков, М. И. Орлюк, В. Н. Шуман, В. Д. Омельченко, И. К. Пашкевич, А. П. Толкунов, Ю. А. Богданов, И. Б. Буркинский, Н. П. Лойко, И. Н. Федотова, И. Г. Захаров, А. М. Черняков, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, Т. В. Лебедь, **А. С. Савченко** // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 44–68.

5. Магнитные поля трехмерных анизотропных тел: теория и практика вычислений / В. И. Старостенко, В. Н. Шуман, И. Н. Иващенко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко**, О. Я. Скриник // Физика Земли. – 2009. – № 8. – С. 20–35.

6. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса / П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, В. И. Старостенко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Геофизический журнал. – 2010. – Т. 32, № 6. – С. 175–215.

7. Об автоматизированной интерактивной обработке графических изображений геологических и геофизических объектов / В. И. Старостенко, В. М. Шарыпанов, **А. С. Савченко**, О. В. Легостаева, И. Б. Макаренко, П. Я. Куприенко // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 54–62.

8. Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины / В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 113–132.

9. Средняя плотность земной коры Кировоградского рудного района и слагающих его структур (центральная часть Украинского щита) / П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Доповіді НАН України. – 2013. – № 11. – С. 103–108.

10. Методы восстановления гармонических функций по магнитному полю  $\Delta T$  и функция В.Н.Страхова  $\Delta S$ : обзор / В. И. Старостенко, В. Н. Шуман, И. К. Пашкевич, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Физика Земли. – 2013. – № 1. – С. 151–160.

11. Куприенко П. Я. Листрические разломы и их взаимосвязь с кольцевыми структурами на Украинском щите / П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, **А. С. Савченко** // Геодинаміка. – 2013. – № 2 (15). – С. 45–48.

12. Gravity and magnetic data inventory for investigation of the Black Sea region / В. Srebrov, М. Orlyuk, L. Pashova, I. Makarenko, A. Marchenko, **A. Savchenko** // Геодинаміка. – 2013. – № 2 (15). – С. 332–335.

13. Трехмерная геолого-геофизическая модель литосферы Центральной части Карельского кратона / И. К. Пашкевич, Н. В. Шаров, **А. С. Савченко**, В. И. Старостенко // Геофизический журнал – 2014. – Т. 36, № 6. – С. 58–78.

14. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto) / В. И. Старостенко, О. В. Легостаева, И. Б. Макаренко, **А. С. Савченко** // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 42–52.

15. Heterogeneous structure of the lithosphere in the Black Sea from a multidisciplinary analysis of geophysical fields / V. I. Starostenko, O. M. Rusakov, I. K. Pashkevich, R. I. Kutas, I. B. Makarenko, O. V. Legostaeva, T. V. Lebed, **A. S. Savchenko** // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 3–28.

16. Плотностная неоднородность земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита по данным трехмерного гравитационного моделирования / В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, **А. С. Савченко**, О. В. Легостаева // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 3. – С. 3–21.

17. Трехмерная геофизическая модель земной коры центральной части Карельского кратона / И. К. Пашкевич, **А. С. Савченко**, В. И. Старостенко, Н. В. Шаров // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 463, № 4. – С. 469–473.

18. Интерактивный программный комплекс Isohypse для построения трехмерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование / В. И. Старостенко, В. М. Шарыпанов, А. В. Шарыпанов, **А. С. Савченко**, О. В. Легостаева, И. Б. Макаренко, П. Я. Куприенко // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38, № 1. – С. 30–42.

*Тези доповідей і матеріали конференцій.*

19. Практическое использование автоматизированного комплекса при интерпретации данных потенциальных полей методом подбора / **А. С. Савченко**, В. И. Старостенко, О. В. Легостаева, И. Б. Макаренко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей : материалы 35-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского, (Ухта, 29 янв. – 3 февр. 2008 г.). – Ухта : УГТУ, 2008. – С. 271–274.

20. Основные типы земной коры Украинского щита по результатам оценки вклада каждого вещественного слоя в полную мощность коры / В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными : материалы 14-й Междунар. конф., (Петрозаводск, 27–31 окт. 2008 г.). – Петрозаводск, 2008. – С. 218–221.

21. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений / В. И. Старостенко, А. Е. Лукин, В. П. Коболев, О. М. Русаков, М. И. Орлюк, В. Н. Шуман, В. Д. Омельченко, И. К. Пашкевич, А. П. Толкунов, Ю. А. Богданов, И. Б. Буркинский, Н. П. Лойко, И. Н. Федотова, И. Г. Захаров, А. М. Черняков, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, Т. В. Лебедь, **А. С. Савченко** // Материалы I конф. «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем», 27–30 сент. 2009 г. – К., 2009. – С. 28.

22. Основные типы земной коры Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса по данным трехмерного гравитационного моделирования / Э. И. Золототрубова, Л. И. Надежка, О. М. Ипполитов, В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Структура, свойства, динамика

и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы : материалы XVI Междунар. конф., (Воронеж, 19–25 сент. 2010 г.). – Воронеж : ВГУ, 2010. – С. 250–253.

23. 3-D плотностная модель Воронежского кристаллического массива / Э. И. Золототрубова, Л. И. Надежка, О. М. Ипполитов, В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко** // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы : материалы XVI Междунар. конф., (Воронеж, 19–25 сент. 2010 г.). – Воронеж : ВГУ, 2010. – С. 294–295.

24. Variations in the crustal types of the Dnieper-Donets Basin and surrounding areas from 3D gravity modelling / V. Starostenko, P. Kuprienko, I. Makarenko, O. Legostaeva, **A. Savchenko** // An International conference on Geodynamical phenomena: from observations and experiments to theory and modelling, (Kiev, September 20–24, 2010). – Kiev : IGRH, Геофизический журнал, 2016. – Т. 32, № 4. – С. 30–42.

25. Theory and practice of calculations of magnetic fields of anisotropic bodies [Электронный ресурс] / V. Starostenko, V. Shuman, O. Legostaeva, **A. Savchenko** // International workshop «Artificial intelligence in the Earth's magnetic field study. Intermagnet Russian segment», (Uglich, 26–28 January 2011). – CD-ROM.

26. Плотностная характеристика литосферы юго-западного сегмента Восточно-Европейской платформы / В. И. Старостенко., П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко**, Л. И. Надежка, Э. И. Золототрубова, О. М. Ипполитов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей : материалы 39-й сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского, (Воронеж, 29 янв. – 3 февр. 2012 г.). – Ухта : УГТУ, 2012. – С. 253–258.

27. Основные типы земной коры Украинского щита и Воронежского кристаллического массива по результатам трехмерного гравитационного моделирования / В. И. Старостенко., П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, О. В. Легостаева, **А. С. Савченко**, Л. И. Надежка, Э. И. Золототрубова, О. М. Ипполитов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей : материалы 40-й сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского, (Москва, 29 янв. – 1 февр. 2013 г.). – М. : ИФЗ РАН, 2013. – С. 313–318.

28. Трехмерная модель земной коры центральной части Карельского кратона / Н. В. Шаров, И. К. Пашкевич, **А. С. Савченко**, В.И. Старостенко // Геофизические методы исследования земной коры : материалы Всерос. конф., посв. 100-летию со дня рождения акад. Н. Н. Пузырева, (Новосибирск, 8–13 дек. 2014 г.). – Новосибирск, 2014. – С. 277–282.

29. Gravity and geomagnetic data for studying geological structures and geodynamical processes in the Black Sea region / B. Srebrov, L. Pashova, M. Orlyuk, I. Makarenko, A. Marchenko, **A. Savchenko** // Bulgarian geological society, National Conference with international participation «Geosciences 2014», (Sofia, 11-12 December, 2014). – Sofia, 2014. – P. 49–50.

30. Automated software system for interpretation of the potential fields (GMT-Auto) / V. Starostenko, O. Legostaeva, I. Makarenko, **A. Savchenko**, P. Kuprienko // 7<sup>th</sup> BgGS

National Conference With International Participation «GEOPHYSICS 2015», (Sofia, May 20–23, 2015). – CD-ROM.

## АНОТАЦІЯ

**Савченко О. С. Автоматизована система кількісної інтерпретації даних потенціальних полів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена створенню нової автоматизованої системи кількісної інтерпретації даних потенціальних полів і її практичній апробації на прикладі вивчення основних геологічних структур території України, а також деяких структур близького і далекого зарубіжжя.

В результаті роботи створено програмні комплекси SpaceMap і Isohypse, що дозволяють виконувати автоматизоване введення в комп'ютер зображень геологічних та геофізичних карт і отримати їх у чисельному вигляді.

Вирішена пряма задача магнітометрії для всіх компонент магнітного поля, обумовлених анізотропними моноклінальними і шаруватими тілами складної форми, з урахуванням закономірностей, встановлених В. М. Завойським.

Створена автоматизована система була використана для побудови тривимірної густинної моделі земної кори та верхньої мантиї Інгульського мегаблока Українського щита, тривимірних густинної і магнітної моделей літосфери центральної частини Карельського кратона, а також густинної моделі осадової товщі Турчанської западини (західні Карпати).

При інтерпретації магнітної аномалії Криворізької структури використана функція  $\Delta S$  В. М. Страхова, яка є більш контрастною, ніж поле  $\Delta T$ .

**Ключові слова:** автоматизована система, програмні комплекси, компоненти магнітного поля, функція  $\Delta S$  В. М. Страхова, тривимірні геофізичні моделі, Інгульський мегаблок, Карельський кратон, Турчанська западина, Криворізька структура.

## АНОТАЦІЯ

**Савченко А. С. Автоматизированная система количественной интерпретации данных потенциальных полей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена созданию новой автоматизированной системы количественной интерпретации данных потенциальных полей и ее практической апробации на примере изучения основных геологических структур территории Украины, а также некоторых структур ближнего и дальнего зарубежья.

В результате работы созданы программные комплексы SpaceMap и Isohypse, позволяющие выполнять автоматизированный ввод в компьютер изображений геологических и геофизических карт и получить их в численном виде.

Программа SpaceMap предназначена для ввода информации, представленной графически в виде тел (областей) и применяется при выполнении исследований консолидированной коры, а именно на щитах. Комплекс Isohypse используется для оцифровки карт, представленных изолиниями и разломами (функциями с разрывами первого рода). Ввод объектов (разломов или изолиний) производится с помощью кривых Безье, что позволяет проще имитировать поверхности геофизических объектов. Определение значения  $Z(x, y)$  геолого-геофизического параметра в каждом узле заданной сетки выполняется разными методами в зависимости от расположения узла относительно других объектов ввода. В программном комплексе Isohypse реализован ряд возможностей, которые обусловлены специфическими требованиями, предъявляемыми к обработке некоторых изображений геофизических объектов: использование изолинии специального типа; возможность вырезать и сохранить данные в любой прямоугольной или географической рамке; получение информации вдоль выбранной линии или последовательности прямых линий для дальнейшего применения при построении двухмерных разрезов. Разработанные программные продукты дают возможность существенно сократить время и физические затраты при вводе геологической и геофизической информации в компьютер, а результаты их работы использовать в качестве входных данных при решении прямых задач геофизики.

Решена прямая задача магнитометрии для всех компонент магнитного поля, обусловленных анизотропными моноклиральными и слоистыми телами, с учетом установленных В. Н. Завойским закономерностей о связи между анизотропией магнитной восприимчивости, тектонической структурой и аномальным магнитным полем. В основе решения прямой задачи магнитометрии лежит вычисление магнитного поля от произвольно расположенного в трехмерном пространстве плоского треугольника.

Созданная автоматизированная система была использована для построения трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита, трехмерных плотностной и магнитной моделей литосферы центральной части Карельского кратона, а также плотностной модели осадочной толщи Турчанской впадины (западные Карпаты). Полученные результаты позволили выявить особенности глубинного строения изучаемых объектов.

При интерпретации магнитной аномалии Криворожской структуры использована функция В. Н. Страхова  $\Delta S$ , которая является более контрастной, чем исходное поле  $\Delta T$ , и может служить дополнительным источником информации о строении рассматриваемой модели.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, программные комплексы, компоненты магнитного поля, функция В. Н. Страхова  $\Delta S$ ; трехмерные геофизические модели, Ингульский мегаблок, Карельский кратон, Турчанская впадина, Криворожская структура.

**ABSTRACT**

**Savchenko O. S. Automated system for quantitative interpretation of potential fields data.** – Manuscript.

A thesis for a Ph.D. degree in physical and mathematical sciences, specialty is 04.00.22 – geophysics. – S. I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis deals with the creation of the automated system of quantitative interpretation of potential fields data and its practical approbation on the example of study of basic geological structures of the territory of Ukraine, as well as some structures near and far abroad.

As a result were built software systems SpaceMap and Isohypse that allows to perform automated entry the images of geological and geophysical maps in PC and get them in numerical form.

The magnetic Direct problem has been solved for all the components of the magnetic field for anisotropic monoclines and layered bodies, subject to the laws established by V. N. Zavoiskii.

An automated system was used to construct three-dimensional density model of the crust and upper mantle of the Ingul megablock of the Ukrainian shield, three-dimensional density and magnetic models of the lithosphere of the Central part of the Karelian craton, and density models of sedimentary strata Turcianska basin (Western Carpathians).

The Strakhov function  $\Delta S$ , which is more contrasting than field  $\Delta T$ , was used for the interpretation of magnetic anomalies of the Krivoy Rog structure.

**Keywords:** automated system, software packages, magnetic field components, Strakhov function  $\Delta S$ , three-dimensional geophysical models, Ingul megablock, Karelian craton, Turcianske depression, the Krivoy Rog structure.

Підписано до друку 15.07.2016 р. Формат 60 x 84/16.

Папір офсетний. Друк цифровий.

Обсяг 0,9 ум.-друк. арк. Наклад 110 прим. Зам. № П-2016-301

Надруковано у центрі оперативної поліграфії ФОП Кравченко Я.О.

03039, м. Київ, пр-кт. В. Лобановського, 119.

Тел. (044) 561-95-31, (067) 506-57-55, (050) 57-06-555.