

УДК 550.831+550.838+550.8.053

Сергій АНІКЕСВ¹, Світлана РОЗЛОВСЬКА¹

¹Кафедра нафтогазової геофізики, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +38(0342)727121, ел. пошта: geophys@nung.edu.ua; anikayevsergiy@gmail.com; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-7377-7326>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0002-9259-6774>

<https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.066>

АНІЗОТРОПНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕГІОНАЛЬНИХ ГРАВІМАГНІТНИХ ПОЛІВ ПІВДЕННОГО СХОДУ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Метою досліджень є аналіз властивостей та геологічної інформативності низки анізотропних трансформацій гравітаційних і магнітних полів, у яких використано процедури осереднення, зокрема способу Андреева – Клушина. Анізотропні перетворення потенціальних полів призначені для виявлення та простеження витягнутих у певному напрямку аномалій або їхніх ланцюжків, які спричинені глибинними лінійними дислокаціями у геологічному розрізі. Вивчення властивостей анізотропних трансформацій ґрунтується на аналізі їхніх глибинних характеристик та теоретичних і практичних експериментах. Методика аналізу особливостей відображення розломної тектоніки, зокрема, на прикладі південного сходу Українських Карпат, у анізотропних аномаліях гравімагнітних полів ґрунтується на пошуку морфологічних ознак прояву глибинних розломів та інших протяжних великих структурно-тектонічних елементів у анізотропних аномаліях гравітаційних і магнітних полів, а також у простеженні цих елементів на основі зіставлення морфології, інтенсивності, розмірів та напрямку простягання анізотропних аномалій з опублікованими тектонічними і геологічними картами регіону. Наведено визначення та алгоритми таких анізотропних трансформацій, як способи Андреева – Клушина антиклінального та терасового типів, анізотропного осереднення та анізотропного різницевого осереднення. Виконано дослідження геологічної інформативності анізотропних трансформацій потенціальних полів на теоретичних і практичних прикладах. Показано, що у морфології анізотропних гравітаційних і магнітних аномальних полів на території південного сходу Українських Карпат простежуються протяжні локальні аномалії, які зумовлені розломною тектонікою, зокрема глибинними поздовжніми та поперечними розломами, а також лінійними ускладненнями осадового покрову. У результаті аналізу анізотропних аномальних полів виявлено низку характерних ознак відображення великих тектонічних зон, регіональної поведінки поверхні фундаменту, глибинних розломів, на основі яких можна побудувати схеми розломної тектоніки південно-східного регіону Українських Карпат. Також простежено значне простягання фундаменту східноєвропейської платформи від Майданського вузла та Покутсько-Буковинських Карпат під Складчасті Карпати. Надано визначення низки анізотропних трансформацій та розглянуто їхні властивості. Обґрунтовано геологічну інформативність морфології анізотропних трансформацій потенціальних полів у дослідженні розломної тектоніки Українських Карпат та прилеглих прогинів. Застосування анізотропних трансформацій потенціальних полів сприятиме підвищенню достовірності та детальності простеження глибинних розломів, а також інших лінійних дислокацій як у фундаменті, так і в осадовому чохлі. Вивчення розломної тектоніки є важливим чинником успішного вирішення завдань із пошуку та розвідки площ, перспективних на поклади нафти і газу.

Ключові слова: Передкарпатський прогин; розломна тектоніка; лінійні дислокації; трансформації гравітаційного і магнітного полів; анізотропне осереднення; глибинні характеристики трансформацій; анізотропні аномалії.

Вступ

Якісна інтерпретація гравімагнітних аномальних полів ґрунтується на візуальному аналізі морфології, інтенсивності, напрямку простягання груп аномалій (аномальних зон), виокремлених зі спостережених потенціальних полів за певними ознаками. Виокремлення зі спостереженого поля аномалій певних параметрів виконується трансфор-

маціями, різновиди яких залежать від геологічних завдань. Інтерпретація спрямована на визначення геолого-тектонічної природи окремих аномалій або аномальних зон, відмінних за морфологічними ознаками, а також оцінювання інтегральних параметрів їхніх геолого-тектонічних джерел. Певних позитивних результатів у використанні трансформацій гравімагнітних полів досягнуто під час

досліджень нафтогазоносних регіонів [Демидова, Каламкаров, 1978], систем розломів фундаменту та у створенні ротаційної гіпотези структуроутворення [Тяпкін та ін., 2000]. Прикладами ефективною геологічної інтерпретації гравімагнітних полів української частини Карпатського регіону є [Маєвський та ін., 2012; Анікеев та ін., 2019; Мончак, Анікеев, 2017 та ін.]. Як показує досвід вивчення тектонічної будови регіону та оцінювання перспектив на поклади нафти і газу окремих ділянок, надзвичайно актуальними завданнями є виявлення та простеження глибинних розломів, систем поздовжніх та поперечних розломів, а також інших підпорядкованих лінійних дислокацій різної природи.

Відмінності характеру відображення глибинної геолого-тектонічної будови регіону у магнітних та гравітаційних аномальних полях зумовлені специфікою їхніх джерел. Аномальне магнітне поле істотно залежить від вмісту феромагнітних мінералів, значно більшого у породах кристалічного фундаменту. Тому магнітне поле чутливіше (порівняно із гравітаційним полем) до характеру залягання поверхні фундаменту, аніж до структурної будови осадового чохла. Проте однаковою морфологічною ознакою прояву глибинних лінійних дислокацій у гравітаційних і магнітних полях є суттєво витягнуті (лінійні) аномалії чи аномальні зони. За визначенням Б. А. Андреева і І. Г. Клушина [Андреев, Клушин, 1962], саме анізотропні трансформації призначені для виокремлення та простеження лінійно витягнутих у певному напрямку аномальних збуджень у гравімагнітних полях, тобто вони є інструментом для вивчення розломної тектоніки. На підставі аналізу результату анізотропних трансформацій у межах При-

каспійської западини простежено вузькі протяжні смуги в аномальному гравітаційному полі та складено схему лінементів [Матусевич, 2013].

Мета

Мета роботи – розвиток способів трансформації гравітаційних і магнітних полів, що ґрунтуються на процедурах анізотропного осереднення, результат якого залежить від вибраного напрямку, а також оцінювання інформативності експериментального застосування анізотропних трансформацій на матеріалах південного сходу Українських Карпат.

На необхідності активного використання і подальшого розвитку теорії та практики лінійних перетворень наголошував у своїх програмних статтях В. М. Страхов [Страхов, 1995].

Вихідні матеріали

Вихідними теоретичними матеріалами роботи є ідеї анізотропного перетворення потенціальних полів, які Б. О. Андреев та І. Г. Клушин виклали у роботі [Андреев, Клушин, 1962] та які основані на процедурах осереднення, яке теоретично обґрунтували А. М. Тихонов та Ю. Д. Буланже [Тихонов, Буланже, 1945].

Вихідними геолого-геофізичними матеріалами слугували: тектонічна карта [Тектоническая карта..., 1986] (рис. 1), гравітаційні й магнітні поля [Схема..., 2002, Карта..., 2002] (рис. 2, 3). Матриці спостережених гравітаційних і магнітних полів сформовано з кроком 500 м (масштаб 1:50000) з точністю побудови карт у 0,25 мгл та 2 нТл, що дає змогу доволі детально вивчати складну морфологію аномальних гравітаційних і магнітних полів регіону.

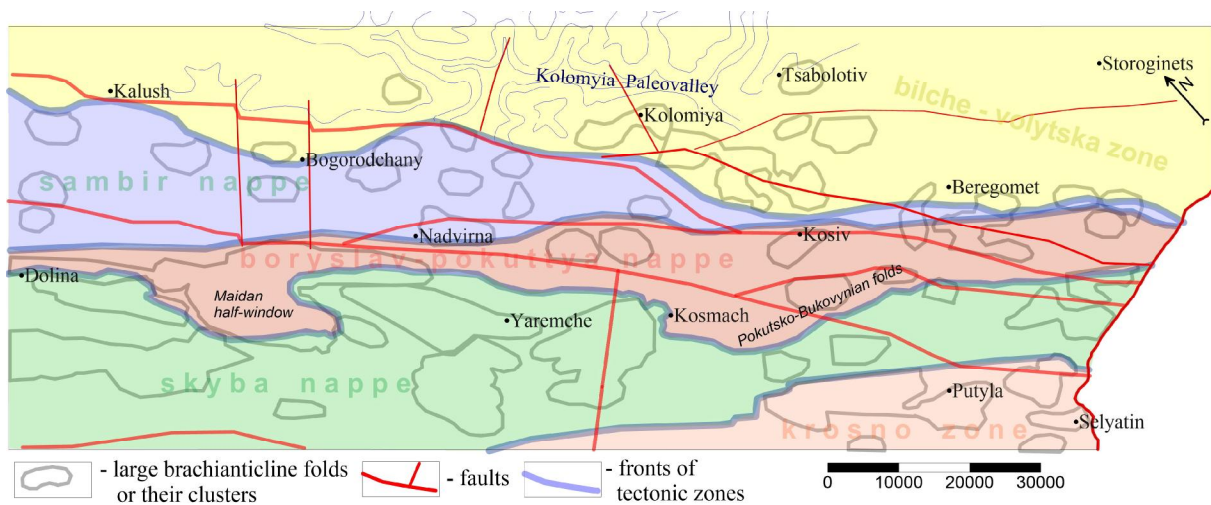


Рис. 1. Тектоніка південного сходу Українських Карпат (фрагмент карти В. В. Глушка, С. С. Круглова та ін., 1986 [Тектоническая карта..., 1986])

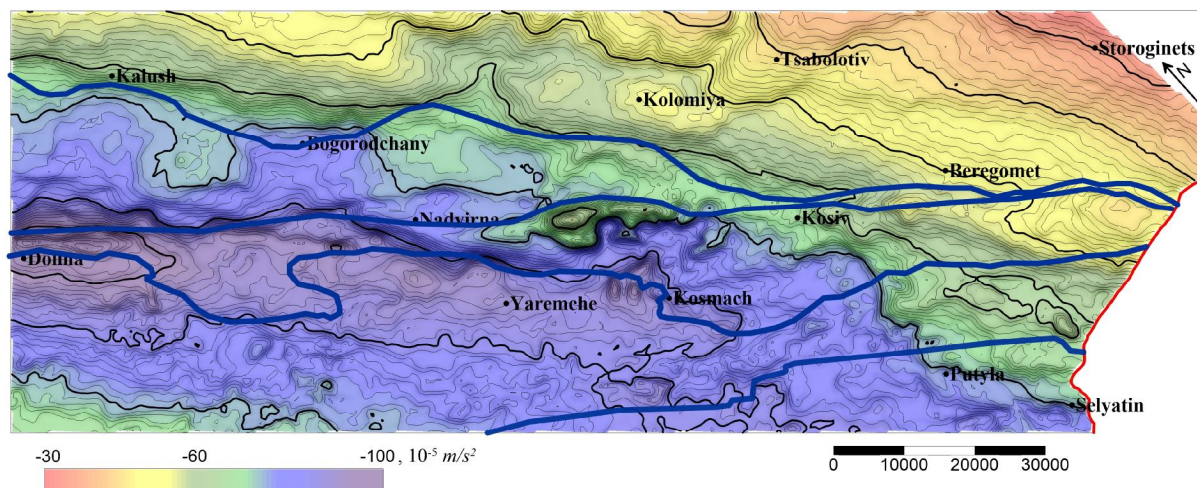


Рис. 2. Аномалії поля сили тяжіння в редукції Буге з елементами тектоніки південного сходу Українських Карпат

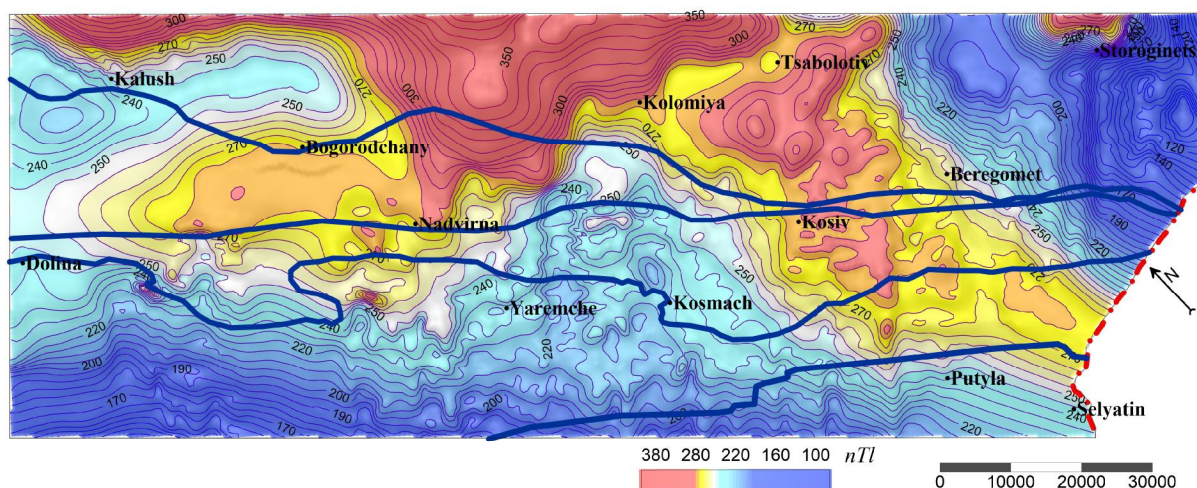


Рис. 3. Аномалії модуля повного вектора магнітного поля з елементами тектоніки південного сходу Українських Карпат

Коротко про методика застосування трансформацій

Методика якісної інтерпретації гравітаційних і магнітних полів ґрунтується на зіставленні особливостей розподілу їхніх аномальних складових із геолого-тектонічними матеріалами. Якісна інтерпретація, яка є важливою частиною геологічної інтерпретації, спрямована на дослідження природи аномалій полів чи їхніх груп, об'єднаних за розташуванням або певними морфологічними ознаками, та на побудову схем тектонічної будови регіону. Інструментами якісної інтерпретації є методи трансформацій.

Ступінь достовірності вирішення геологічних завдань залежить від можливості аналізу аномалій передбачуваної природи. У застосуванні трансформацій визначальними є геологічні завдання, які з формальних позицій є завданнями виділення або підсилення певних локальних особливостей

поля. Саме тому потрібно віддавати перевагу трансформаціям із відомими властивостями. Зміст та параметри трансформацій можна оцінити за їхньою глибинною характеристикою, яка відображає якісний зв'язок між мірою послаблення (або посилення) аномалій та відносною глибиною залягання їхніх джерел ([Андреев, Клушин, 1962] та ін.). У практиці застосування трансформації осереднення гравітаційного поля радіус вікна трансформації R має приблизно дорівнювати або бути більшим від глибини досліджень:

$$R > h. \tag{1}$$

За достатнє послаблення локальних аномалій прийнято зменшення їхньої інтенсивності не менше ніж на 60 %, що досягається, якщо $\varepsilon \leq 0,6$ (рис. 4). Осереднене поле приймають за регіональний фон (регіональну складову), під яким розуміють низькочастотні аномалії, джерела яких розташовані глибше від вибраної глибини h .

Відмінність між спостереженим полем і осередненим є полем локальних аномалій, які спричинені джерелами, розташованими переважно на глибинах $h < R$.

Чим ближча форма геологічних об'єктів (джерел аномалій) до ізометричної, тим достовірнішою є умова (1).

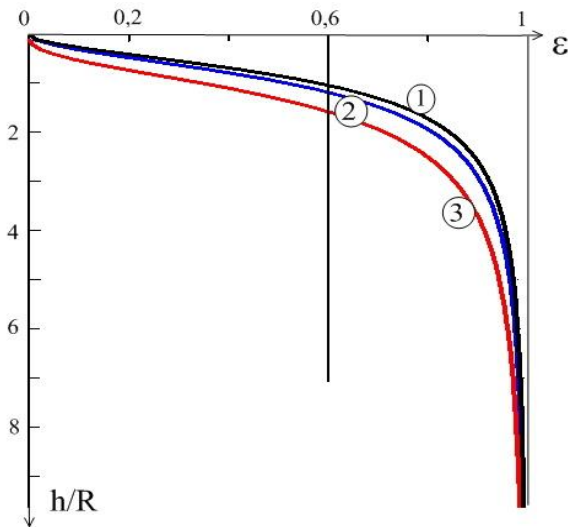


Рис. 4. Відносні глибинні характеристики трансформації осереднення поля сили тяжіння Δg (1), модуля повного вектора ΔT (2) і вертикальної складової ΔZ (3) магнітного поля [Анікеєв, Максимчук, 2019]:

R – радіус вікна трансформації; h – глибина залягання джерел аномалій; ε – ступінь послаблення інтенсивності локальної аномалії

Зіставлення глибинних характеристик дає можливість оцінити залежність інтервалів глибин ймовірного залягання джерел локалізованих аномалій від параметрів вікон трансформацій. З порівняння глибинних характеристик трансформацій осереднення гравітаційного і магнітного полів (рис. 4) випливає, що для достатнього послаблення аномалій магнітних полів ΔT , ΔZ умова інша:

$$h \leq (1,2 \div 1,5) \cdot R. \quad (2)$$

Порівняння (1) та (2) дає змогу оцінити співвідношення глибини джерел гравітаційних і магнітних аномалій, які мають однакові розміри та виділяються у спостережених полях за допомогою трансформацій осереднення тотожних параметрів. За цими даними джерела магнітних аномалій розташовані на глибинах $(1,2 \div 1,4) \cdot h$, де h – глибини джерел гравітаційних аномалій.

Вочевидь, різниця між двома локальними полями, які визначено за різними радіусами вікна осереднення R_2 і R_1 ($R_2 > R_1$), є групою різницевого локальних аномалій, спричинених джерелами, переважно розташованими у смузі глибин $R_1 \div R_2$. Щоб отримати поле різницевого аномалій, простіше узяти різницю: осереднення з R_1 мінус

осереднення з R_2 . Трансформація різницевого осереднення призначена для локалізації групи аномалій, зумовленої переважно певною смугою глибин геологічного розрізу. Вона є комбінованою трансформацією, подібною до трансформації Саксова – Нігарда (ненормованою), та смуговим фільтром. Глибинні характеристики різницевого осереднення наведено нижче.

Перелік морфологічних ознак прояву структурних форм та лінійних дислокацій геологічного розрізу у полях ізотропних локальних аномалій, поданих у вигляді розподілу ізоліній або у рельєфно-тіньовому зображенні, наведено у роботах [Маєвський та ін., 2012; Анікеєв, Максимчук, 2019].

Анізотропні трансформації

У практиці поширено застосування трансформацій, у яких вікном перетворення потенціальних полів є коло (або квадрат), тому результат не залежить від напрямку. Крім “ізотропних” трансформацій, практичне значення можуть мати “анізотропні” перетворення, у яких застосовано чутливість до аномальних форм, які корелюють у певному напрямку. Їх відмінність – видовжене вікно: прямокутник або еліпс. Ці “анізотропні” трансформації здатні на тлі строкатої морфології геофізичного поля, яка зумовлена складною будовою геологічного розрізу, виділяти смугові, видовжені аномалії або ланцюжки аномалій, спричинені лінійними дислокаціями [Клушин, Толстихин, 1961] (тектонічними порушеннями, насувами, скидами тощо), з якими часто пов’язані родовища корисних копалин.

Характерні ознаки лінійних дислокацій у гравімагнітних полях такі [Андреев, Клушин, 1962]:

- 1) значна протяжність аномалій, яка істотно перевищує їхні поперечні розміри;
- 2) більш-менш стале простягання у межах площі досліджень;
- 3) кореляція лінійних аномалій, які зумовлені протяжними дислокаціями, є різко анізотропною величиною.

Фонова частина поля, яка перешкоджає візуальному простеженню аномалій лінійних дислокацій, містить складові із різною кореляцією. Це можуть бути і різкі аномалії, що утворюють складний “мозаїчний” візерунок, і плавні зміни поля, що характеризуються різним простяганням. Для вилучення складного “мозаїчного” фону потрібне осереднення або перерахунок на висоту. І, навпаки, для виокремлення або підсилення ефекту від лінійних дислокацій потрібне перетворення типу диференціювання. Одночасне втілення таких дій забезпечується комбінованим вікном (рис. 5).

Вікно (“палетка”) складається зі щільно розташованих сильно витягнутих п’ятьох еліпсів (у первинному варіанті Б. О. Андреева і І. Г. Клушина – чотирьох прямокутників). На рис. 5 пока-

зано положення вікна за кута її нахилу $\gamma = 0^0$, який визначається між віссю x та напрямком малих осей еліпсів. Головна вісь вікна перпендикулярна до лінії малих осей еліпсів (штрих-пунктиром показано варіанти її напрямку – передбачено обертання вікна, наприклад, через кожні 45^0).

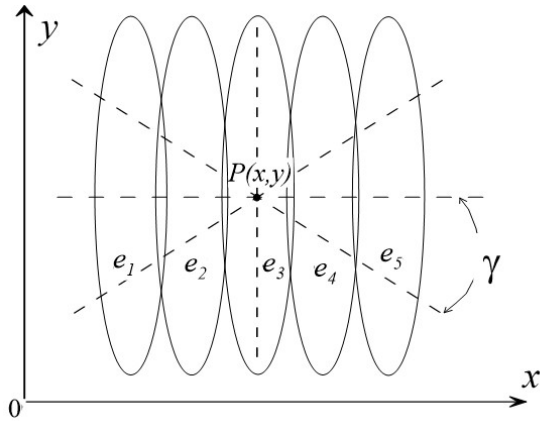


Рис. 5. Загальний вигляд вікна анізотропної трансформації Андреева – Клушина у варіанті комбінації еліпсів

Алгоритм застосування вікна стандартний: на карті геофізичного поля центр палетки суміщають з пікетом $P(x, y)$, якому буде присвоєний результат розрахунків. У межах кожного з еліпсів визначають середнє значення аномального поля. Підраховані середні значення використовують для обчислення таких різниць:

$$\Delta_1(x, y) = \frac{2}{3}(\overline{U_2} + \overline{U_3} + \overline{U_4}) - \overline{U_1} - \overline{U_5} \quad (3)$$

$$\Delta_2(x, y) = \overline{U_1} + \overline{U_2} - \overline{U_4} - \overline{U_5} \quad (4)$$

За напрямком головної осі спостерігатиметься найвища чутливість як до протяжних аномалій, так і до змін їхнього простягання. Аномалії, які за простяганням перпендикулярні до головної осі, навпаки, максимально послаблятимуться. Максимальні значення трансформованого поля за

формулою (3) будуть там, де є аномалії від лінійних дислокацій, напрям яких збігається із напрямком видовженої осі палетки, та коли їх поперечний переріз є порівняно симетричним максимумом антиклінального типу. Якщо розрахунки дають від’ємні мінімальні значення, маємо випадок порівняно симетричного мінімуму синклінального типу. Якщо виконати розрахунки за формулою (4), максимальні значення отримаємо за наявності антисиметричних змін у полі (градієнтних смуг), але також за умови, що у них той самий напрям, що й вікна. У цьому випадку одержуємо аномалії типу “сходінки”.

Коли вікно розташоване на карті поля поза зоною лінійних дислокацій, дрібні варіації багатозово змінюються в інтервалі, що дорівнює довжині палетки, і тому вони будуть послаблені за рахунок осереднення у межах кожного еліпса. Плавні, кореляційні зміни, які є регіональним фоном, під час обчислень різниць будуть зведені практично до нуля. Такий самий результат отримаємо у разі, якщо у межах зон лінійних дислокацій вісь вікна буде перпендикулярною до їхнього основного простягання.

Б. О. Андреев і І. Г. Клушин пропонували послідовно змінювати напрям осі палетки в кожній із розрахункових точок та залежно від значення різниць Δ_1 і Δ_2 (3, 4) встановлювати простягання шуканих лінійних дислокацій. Якщо ж простягання відомо за незалежними даними, можна обмежитися певними положеннями вікна, що істотно прискорює виконання трансформацій. Зазначимо, що в умовах Українських Карпат загалом відоме простягання поздовжніх та поперечних дислокацій. Тому у практичному прикладі, який наведено нижче, ми вибрали лише два напрямки головної осі анізотропних трансформацій: північно-західний та північно-східний.

Розглянемо властивості анізотропних трансформацій у варіанті їхніх найпростіших реалізацій: анізотропного осереднення та різницевого осереднення, вікна яких показано на рис. 6.

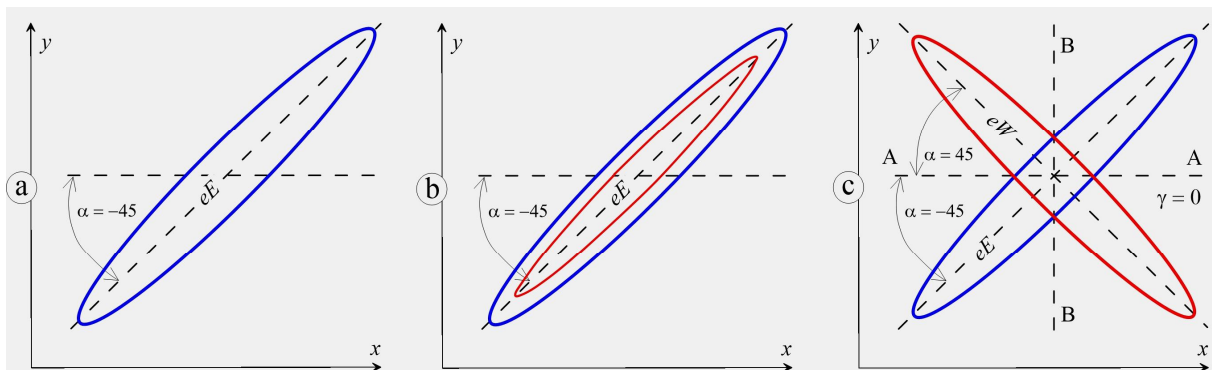


Рис. 6. Вікна анізотропних трансформацій осереднення та різницевого осереднення з кутами нахилу $\alpha = \pm 45^0$

Анізотропне осереднення виконується за допомогою вікна, яке складається із одного еліпса

(рис. 6, а). Уздовж великої осі еліпса відбуватиметься значне осереднення, отже, підкреслювати-

муться протяжні аномалії або ланцюжки аномалій уздовж напрямку осі, а також практично незмінними залишаються регіональні (розміри яких більші за велику вісь еліпса) аномалії. Якщо ж визначити різницю між спостереженим полем та анізотропним осередненням, то з поля будуть вилучені (або пригнічені) зазначені аномалії. Різниці між спостереженим полем і анізотропними трансформаціями або між анізотропними трансформаціями задля стислості називаємо анізотропними аномаліями.

Трансформації різницевого анізотропного осереднення, результатом яких є різниці анізотропні аномалії, побудовано у двох версіях:

1) різниця двох осереднень: осереднення з малим еліпсом мінус осереднення із більшим еліпсом (рис. 6, *b*);

2) різниця двох осереднень із однаковими вікнами-еліпсами, однак різноспрямованих:

$$\Delta \bar{g}_{WE} = \bar{g}_W - \bar{g}_E; \quad (5)$$

напрямок їхніх великих осей північно-західний та північно-східний; кут між ними 90° (рис. 6, *c*).

За різницевою анізотропною трансформацією першого типу отримаємо результат, подібний до різниці між спостереженим полем і анізотропним осередненням, але з ефектом згладжування впливу верхньої частини розрізу. Міркування щодо оцінювання умовної глибини поділу розрізу на верхню та нижню частину (або максимально можливої глибини залягання джерел виокремлених аномалій) викладаємо нижче.

За різницевою анізотропною трансформацією другого типу послаблюватимуться регіональні аномалії та видовжені аномалії, спрямування яких відрізняється від напрямку великої осі еліпсів, а також спостерігатиметься істотне пригнічення малих аномалій, розміри яких менші за малу вісь еліпсів. Отже, у полі анізотропних аномалій залишатимуться переважно аномалії, простягання яких збігатиметься з напрямком великих осей еліпсів, а найбільше будуть послаблені ізометричні аномалії та витягнуті й лінійні аномалії, простягання яких збігатиметься з осями симетрії вікна різницевого осереднення (А-А, В-В), названого “вікно-метелик” (рис. 6, *c*). Відповідно до вибраного прикладу розташування еліпсів у вікні-метелику поле різницевих аномалій міститиме переважно аномалії північно-західного та північно-східного спрямування.

Повернемось до трансформації Андреєва – Клушина. Алгоритми перетворень (3) та (4) для випадку $\gamma = 0^\circ$ (рис. 5) можна переписати так:

$$\Delta_1 = \Delta \bar{g}_{Ani}(x, y)_{\gamma=0} = \frac{2}{3} [\bar{g}_{e2}(x - \Delta x, y) + \bar{g}_{e3}(x, y) + \bar{g}_{e4}(x + \Delta x, y)] - \bar{g}_{e1}(x - 2\Delta x, y) - \bar{g}_{e5}(x + 2\Delta x, y) \quad ; \quad (6)$$

$$\Delta_2 = \Delta \bar{g}_{Terr}(x, y)_{\gamma=0} = \bar{g}_{e1}(x - 2\Delta x, y) - \bar{g}_{e5}(x + 2\Delta x, y) + \bar{g}_{e2}(x - \Delta x, y) - \bar{g}_{e4}(x + \Delta x, y) \quad ; \quad (7)$$

де $P(x, y)$ – центр вікна трансформації, Δx – розмір малої осі еліпса.

Анізотропні аномалії, отримані у результаті трансформації за варіантом (6), є аномаліями антиклінального типу; за варіантом (7) – аномаліями терасового типу; власне анізотропні трансформації за першим варіантом – А-трансформаціями, за другим – Т-трансформаціями [Anikeyev, et al, 2021].

Оцінювання параметрів анізотропних трансформацій

Розміри аномалій у плані залежать від глибини залягання їхніх джерел, а також від розмірів та ступеня горизонтального простягання цих джерел. За фіксованої глибини та сталих інших параметрів мінімальні розміри мають аномалії точкових (або ізометричних) джерел. Вочевидь, простягання аномалій від протяжних горизонтальних пластів, витягнутих структур або лінійних дислокацій (насувів, зсувів, розломів) дорівнює або є більшим за простягання цих джерел (у напрямку їхнього простягання). На основі цих двох критичних випадків (тривимірного та двовимірного) можна оцінити інтервал можливих розмірів аномалій (у межах півмаксимуму):

$$(2/1,31) \times h \div L \text{ (для гравітаційних аномалій);} \\ h \div L \text{ (для магнітних аномалій);} \quad (8)$$

де h – глибина залягання джерела; L – розміри сильно витягнутих структур у плані.

З викладених співвідношень та з глибинної характеристики трансформації ізотропного осереднення (рис. 4) випливає залежність між радіусом вікна осереднення R та глибиною h залягання ізометричних джерел (див. формулу (1)), аномалії яких будуть послаблені у трансформованому полі більш ніж на 60 %.

Параметри анізотропних вікон (рис. 5, 6) подібно залежать від розмірів аномалій лінійних дислокацій та аномалій-перешкод. Ширина комбінованого вікна має бути невеликою, але не меншою від ширини зон, які прагнемо виділити. Зі збільшенням довжини палетки підвищується чутливість до лінійних аномалій та посилюється послаблення перешкод. Проте, для забезпечення належного простеження зон, необхідно, щоб довжина вікна була принаймні удвічі меншою від мінімальної протяжності шуканих лінійних дислокацій.

Наведемо формальний підхід до оцінювання параметрів вікон анізотропних трансформацій.

Для послаблення аномалій від лінійних структур завдовжки L радіус вікна осереднення повинен становити:

$$R > L. \quad (9)$$

Важливо оцінити ступінь послаблення витягнутих аномалій (аномалій двовимірного типу від циліндричних тіл) трансформацією осереднення уздовж профілю, що уперек їхнього простягання. За класичним підходом глибинна характеристика для тривимірних аномалій визначається

як залежність ступеня послаблення аномалії точкового джерела (або кулі) від глибини її залягання, нормованої на радіус осереднення (рис. 4). Подібно можна визначити глибинну характеристику для двовимірних аномалій (наприклад аномалії від горизонтального циліндра), але за профілем, що перпендикулярний до їхнього простягання. Нескладно переконатись, що глибинна характеристика осереднення для двовимірних гравітаційних і магнітних аномалій тотожна:

$$\varepsilon(h) = \arctg(P)/P, \quad (10)$$

де $P = R1/h$.

Порівняння глибинних характеристик трансформацій осереднення ізометричних та суттєво витягнутих аномалій (рис. 7, 8) показує, що ступінь послаблення останніх (у поперечному напрямку до їхнього простягання) в інтервалі практичних значень (0,4÷0,8) буде таким самим, або більшим, за умови (порівняйте з формулою (1)):

$$R > 2 \cdot h. \quad (11)$$

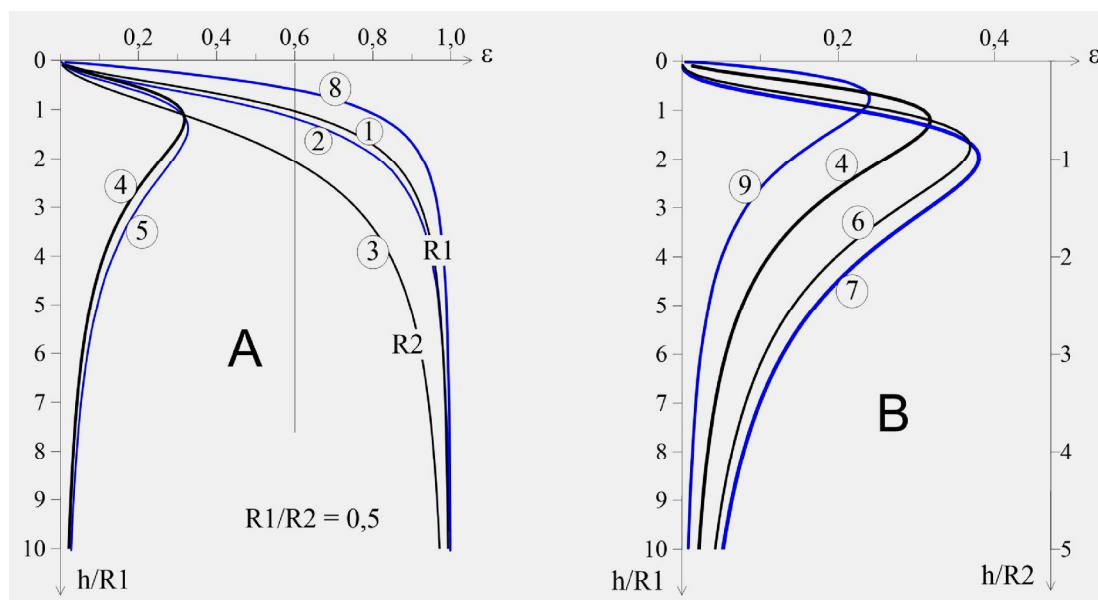


Рис. 7. Відносні глибинні характеристики трансформацій:

1, 3 – для осереднення аномалій гравітаційного поля ізометричних джерел (співвідношення радіусів осереднення $R2 = 2R1$); 2 – осереднення аномалій магнітного поля ізометричних джерел; 4 – різницевого осереднення аномалій гравітаційного поля ізометричних джерел; 5 – різницевого осереднення аномалій магнітного поля ізометричних джерел; 6 – трансформації Саксова – Нігарда [Saxov and Nygaard, 1953] гравітаційного поля; 7 – трансформації Саксова – Нігарда магнітного поля; 8 – (анізотропного) осереднення гравітаційних і магнітних аномалій у перпендикулярному напрямку до простягання циліндричних тіл (практично збігаються); 9 – (анізотропного) різницевого осереднення гравітаційних і магнітних аномалій у перпендикулярному до простягання циліндричних тіл напрямку; інші умовні позначення – на рис. 4

Параметри інших комбінованих анізотропних трансформацій, основаних на процедурах осереднення (наприклад, Андреєва – Клушина), на наш погляд, оцінюються аналогічно. Еліпси у вікні розташовані щільно,

Призначення анізотропних трансформацій – виокремлення аномалій лінійних дислокацій, тому нерівність (9) показує, які за розмірами лінійні дислокації переважно будуть відображені у анізотропних аномаліях, а оцінка (11) вказує на обмеження глибини їхнього залягання. Параметрами анізотропних перетворень є розміри еліпсів. За оцінкою (9) визначають розміри великої осі, за (11) – малої осі еліпсів. Чим менший малий радіус еліпса, тим вужчі аномалії виокремлюватимуться у спостереженому полі на фоні інших, і, значить, меншої глибини залягання лінійні джерела будуть відображені у анізотропному аномальному полі. Важливо, щоб розміри великої осі еліпсів були відчутно більшими за максимальні розміри аномалій, прояв яких потрібно послабити, але меншими за розміри корисних лінійних аномалій, або ланцюжків взаємопов'язаних ізометричних чи витягнутих у напрямку великої осі еліпсів локальних аномалій, які потрібно простежити (підкреслити) у потенціальних полях.

тому відстань між ними дорівнює розмірам малої осі еліпсів. Звісно, кожний тип комбінованої трансформації має свою глибинну характеристику, відповідно до якої оцінки можуть відрізнятися від (1, 8, 11).

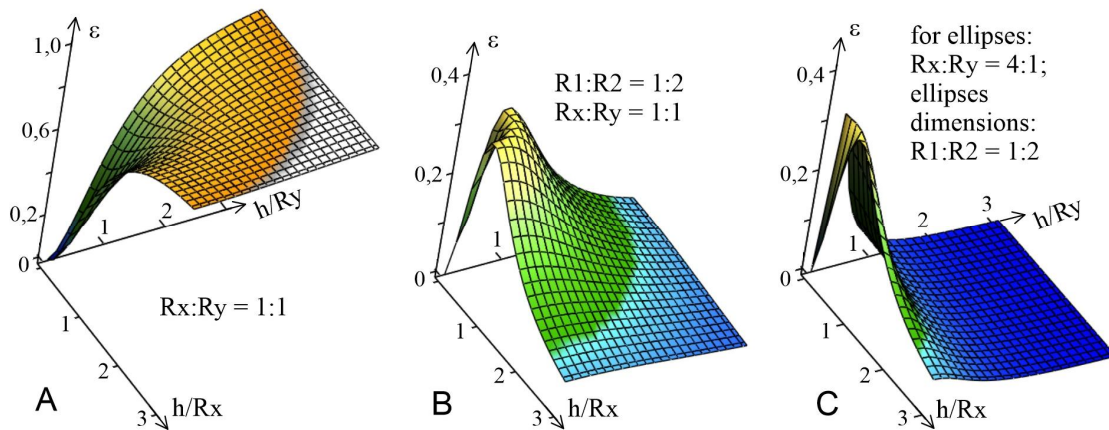


Рис. 8. Відносні глибинні характеристики ізотропного осереднення (А), ізотропного різницевого осереднення (В) та анізотропного різницевого осереднення (С) у тривимірному зображенні

У теорії трансформації потенціальних полів їх представляють математичними фільтрами, які мають певні частотні характеристики. Трансформація осереднення є фільтром низьких частот, її частотна характеристика (аналог спектра прямокутного імпульсу) залежить від розмірів вікна осереднення R . На рис. 9 для порівняння наведено приклади частотних характеристик ізотропних трансформацій осереднення та різницевого осереднення (або анізотропних, але уздовж простягання витягнутих аномалій), а на рис. 10 – ті самі частотні характеристики у варіанті тривимірному зображенні [Anikeuev, et al, 2019].

Зазначимо, що трансформація Саксова – Нігарда та різницеві осереднення є смугастими фільтрами. Зіставлення їхніх глибинних характеристик (рис. 7, В) надає можливість оцінити інтервал смуги глибин залягання джерел тих аномалій, які локалізуються на фоні інтенсивного послаблення інших аномалій, для різних співвідношень $R1/R2$, а також дає змогу переконатись у більшій роздільній здатності різницевих осереднень порівняно із трансформацією Саксова – Нігарда.

Характеристики анізотропних трансформацій залежні від напрямку головної осі вікна і тому наочніші у тривимірному зображенні (рис. 8, 10).

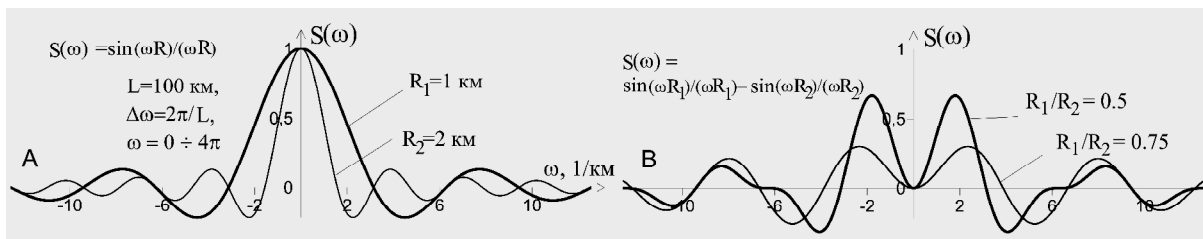


Рис. 9. Частотні характеристики осереднення (А) та різницевого осереднення (В) $S(\omega)$ – спектр перехідної характеристики фільтра; ω – частота; $R_{1,2}$ – різні радіуси вікна трансформації; L – вибрана довжина сигналу

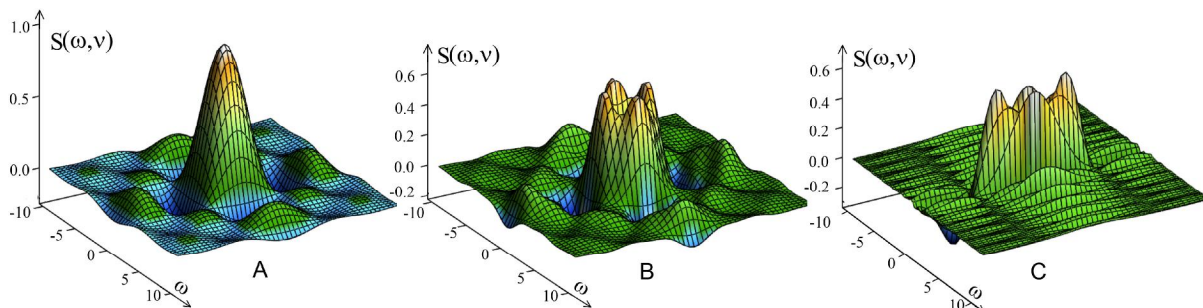


Рис. 10. Частотні характеристики осереднення (А), різницевого осереднення (В) та анізотропного різницевого осереднення (С) у тривимірному зображенні

Анізотропні трансформації на тестових прикладах

Приклад успішного випробовування алгоритму анізотропної трансформації за варіантом Б. О. Андреева, І. Г.-Клушина наведено у їхній роботі [Андреев, Клушин, 1962], де фонове мозаїчне поле та ізометричні аномалії відфільтровані зі складного за морфологією поля, натомість виокремленими анізотропними аномаліями підкреслено простягання лінійних дислокацій.

Для тестування різницевої анізотропної трансформації із вікном-метеликом вибрано поле, у якому спостерігаються корисні аномалії північно-західного простягання, фонові лінійні аномалії широтного простягання та вузька аномалія, видовжена у північному напрямку (рис. 11, *a*). Параметри вікна-метелика: співвідношення осей еліпсів 1:10, кут нахилу осі симетрії комбінованого вікна $\gamma=0^{\circ}$ (рис. 6, *c*). У полі різницевої анізотропних аномалій (рис. 11, *b*) повністю відсутні регіональна аномалія широтного простягання та вузька локальна аномалія північного простягання, але наявні практично незмінні лінійно витягнуті аномалії, північно-західного простягання, що збігається із великою віссю одного із двох еліпсів. Трансформоване поле порівняно із вихідним полем менше за розмірами задля усунення крайових ефектів.

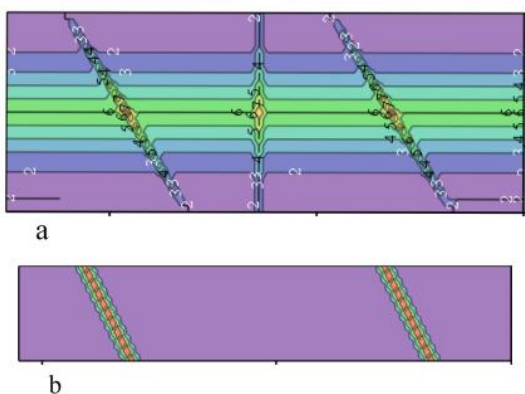


Рис. 11. Приклад тестового поля (*a*) і результату анізотропного різницевого осереднення (*b*)

Трансформації Андреева – Клушина, а також анізотропне різницеве осереднення є комбінованими трансформаціями та характеризуються властивістю згладжування завад і послаблення дрібних аномалій різних знаків. У практичному застосуванні цих трансформацій важливо, щоб розміри їхніх вікон були більшими за розміри більшої осі дрібних аномалій.

Характерні риси відображення тектонічної будови регіону в гравімагнітних полях

Інтенсивність гравітаційного поля південного сходу Українських Карпат помітно зменшується приблизно до лінії Долина – Яремче, де

спостерігається відомий Карпатський гравітаційний мінімум, далі у напрямку до Закарпатського прогину поступово зростає (рис. 2); загалом ізонамали спрямовані з південного сходу на північний захід у напрямку простягання тектонічних зон. Градієнтні зони спричинені глибинними розломами, ускладнення ізонамал відображають морфологію Коломийської палеодолини, розгалуження Передкарпатського розлому, перетин поздовжніх та поперечних глибинних розломів, а також зміни у їхньому простяганні (рис. 2).

Інтенсивність магнітного поля у межах області досліджень зменшується у тому самому напрямку і через ту саму причину: під впливом збільшення глибини залягання поверхні фундаменту Східноєвропейської платформи. Інтенсивність поля незначно зростає у межах зони між платформою та Складчастими Карпатами; контури цієї аномалії мають складну морфологію та пояснюються впливом скиду значної амплітуди – Передкарпатським розломом та його розгалуженнями. Ускладнення ізодинам зумовлені блоковою будовою фундаменту, рельєфом його поверхні та впливом систем розломів (рис. 3).

Деякі істотні розбіжності між морфологією гравімагнітних полів та розломною тектонікою і контурами тектонічних зон пояснюються інтегральним впливом геолого-тектонічної будови геологічного розрізу на потенціальні поля (серед багатьох факторів можна згадати такі, як кути нахилу глибинних розломів, геометрія насуну товщ певних тектонічних зон, що покривають породи іншої зони у розрізі, кут нахилу вектора магнітного поля, а також вектора намагніченості гірських порід тощо) та принципами і поглядами, які покладено в основу визначення проєкцій тектонічних зон (та систем розломів) на земну поверхню під час побудови тектонічної карти [Тектоническая карта Украинских Карпат..., 1986].

Анізотропні трансформації гравімагнітних полів південного сходу Українських Карпат

В анізотропних трансформаціях гравітаційних і магнітних полів південного сходу Українських Карпат та Передкарпатського прогину розміри вікон визначено за глибинними характеристиками з урахуванням глибин залягання поверхні фундаменту. Еліпси у вікнах такі: великий радіус – 5000 м, малий – 500 м (масштаб карти 1:50000); орієнтування еліпсів: північно-західне або/та північно-східне.

Особливості морфології анізотропних аномалій висвітлено у порівнянні з локальними аномаліями, отриманими за допомогою ізотропного осереднення полів (рис. 12, 13); а також усі карти зіставлено з тектонічними зонами.

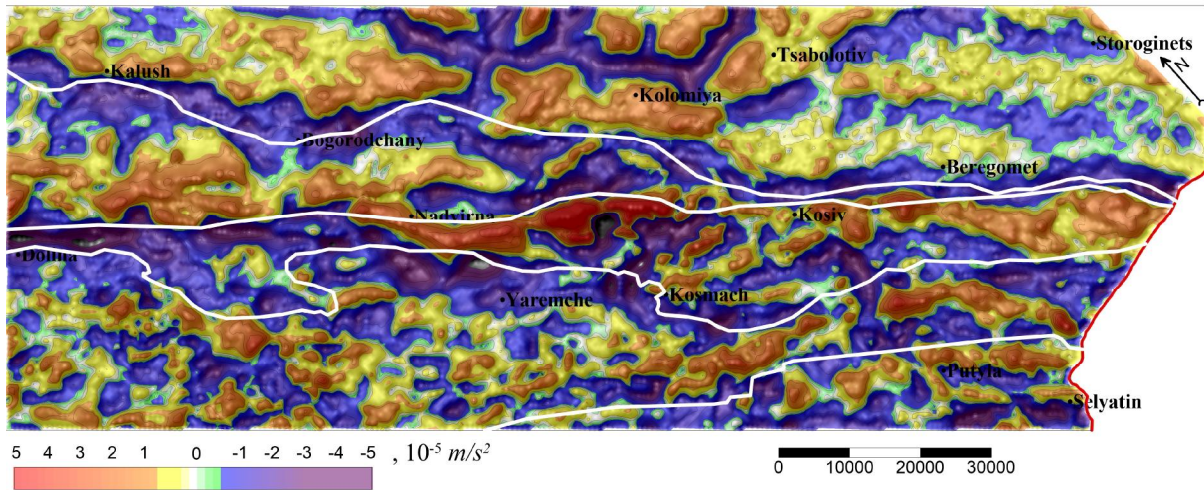


Рис. 12. Локальні аномалії (радіус вікна ізотропної трансформації осереднення $R = 5000$ м) поля сили тяжіння південного сходу Українських Карпат [Anikeyev, et al, 2020]

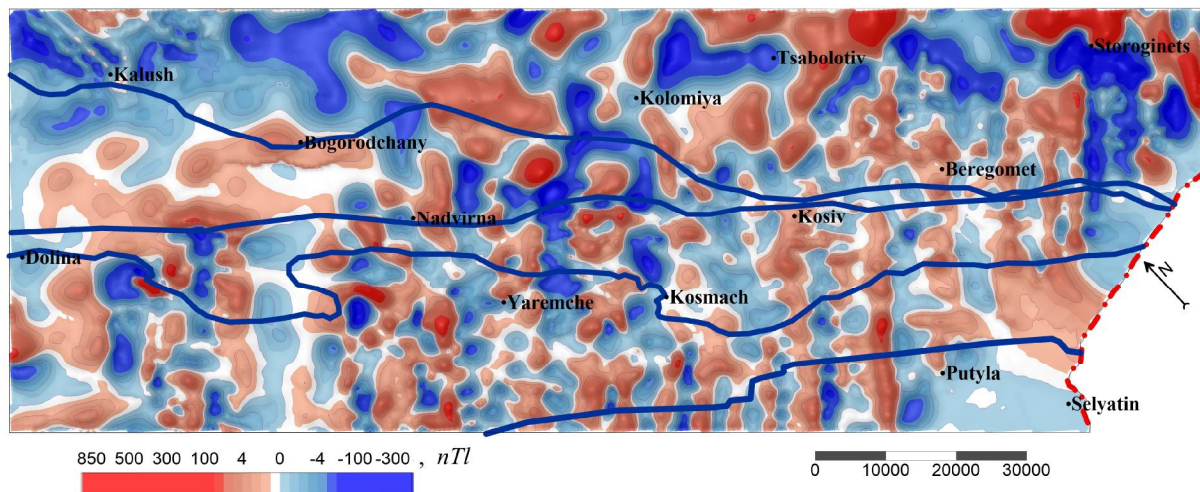


Рис. 13. Локальні аномалії (радіус вікна ізотропної трансформації осереднення $R = 5000$ м) магнітного поля південного сходу Українських Карпат

На рис. 14 відображено локальні анізотропні гравітаційні аномалії, які отримано вилученням зі спостереженого поля результату анізотропного осереднення із вікном-еліпсом північно-східного (рис. 14, А) та північно-західного спрямування (рис. 14, В). Відповідно зі спостереженого поля вилучено великі ізометричні аномалії та аномалії явно північно-східного (рис. 14, А) або північно-західного простягання (рис. 14, В).

У межах схилу платформи переважають доволі широкі смуги груп додатних аномалій північно-західного простягання (рис. 14, А). Вигляд аномального поля у межах Бориславсько-Покутського покриву (БПП) дещо відрізняється від його морфології у межах іншої частини Складчастих Карпат, де вплив ускладнень фундаменту менший за рахунок потужного осадового покриву і де переважає вплив ярусів складок, витягнутих у поперечному напрямку (північно-західному) до насуву. На основі порівняння південно-західного

контуру БПП (фронту Скиб) та морфології смуги від'ємних аномалій можна припустити, що він істотно продовжується під Скибами, місцями на відстань більше ніж 10 км, але крім ділянок Майданського та Покутсько-Буковинського виступів, де ймовірна крутіша лінія розмежування цих покривів, що, можливо, зумовлено тут глибинним виступом фундаменту платформи.

Картина розподілу анізотропних аномалій різко змінюється, якщо вилучити смуги груп аномалій північно-західного простягання (рис. 14, В). Тут чітко простежується зміна морфології та напрямків витягнутих аномалій по лінії, яка місцями збігається із фронтом БПП, точніше, із зоною простягання Передкарпатського розлому. Також у центрі регіону досліджень виявлено вузлові аномалії, пов'язані із впливом Березівської структури [Заяць, Анікєєв 2008; Анікєєв та ін., 2013] та Передкарпатського розлому. За змінами у морфології аномалій регіон можна поділити на три

ділянки. Перша (північно-західна) простягається до м. Надвірна, друга – центральна (від м. Надвірна до м. Косів) і третя – від м. Косів до кордону з

Румунією. У межах Складчастих Карпат центральну ділянку можна поділити на дві з умовними назвами – Яремчанська зона та Космачська зона.

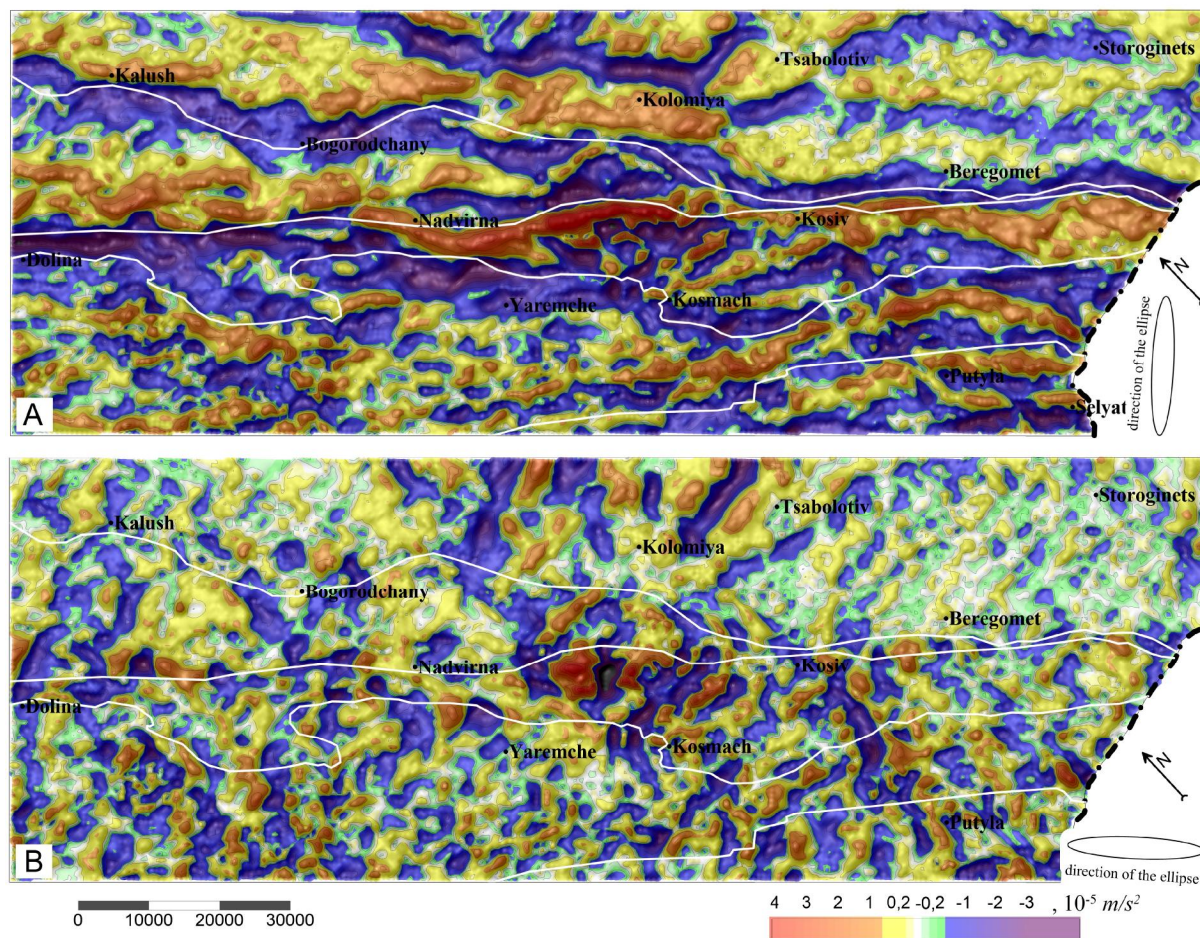


Рис. 14. Локальні анізотропні аномалії (спостережене поле мінус анізотропне осереднення) поля сили тяжіння переважно не північно-східного простягання (А) (спрямування вікна-еліпса північно-східне) та переважно не північно-західного простягання (В) (спрямування вікна-еліпса північно-західне) із наявністю невеликих ізометричних аномалій (розміри яких значно менші за 5000 м)

В анізотропних магнітних аномаліях, які отримані подібним способом, також відбувається поділ регіону за морфологією та розмірами аномалій на платформу та геосинклінальну зону практично по фронту БПП. Добре виділяється і Яремчанська зона (рис. 15, А). Натомість у полі за варіантом вилучення великих ізометричних аномалій та аномалій північно-західного напрямку (рис. 15, В) явно переважають сильно витягнуті у поперечному (північно-східному) напрямку аномалії. Їхнє простягання простежується від Складчастих Карпат далеко на схил платформи. Вони слабо “реагують” на перетин високоамплітудного Передкарпатського розлому та, ймовірно, відображають мережу глибинних поперечних розломів фундаменту.

Різницеві анізотропні аномалії гравітаційного поля, отримані комбінованою трансформацією з вікном у варіанті, що на рис. 6, b (радіуси еліпсів:

500 м – 2500 м, 1000 м – 5000 м), містять переважно аномалії, витягнуті у іншому напрямку, ніж еліпси. Також вони містять аномалії, спричинені лінійними дислокаціями, протяжність яких явно більша за розміри великої осі малого еліпса, та великі (більші за великий еліпс), і малі ізометричні аномалії (менші за малу вісь малого еліпса) пригнічені. На рис. 16 відображено різниці анізотропні аномалії із північно-східним та північно-західним спрямуванням еліпсів. У межах як схилу платформи, так і Складчастих Карпат результат трансформації загалом відповідає очікуванням. Відповідно до змісту глибинної характеристики комбінованої трансформації анізотропного різницевого осереднення (рис. 7, 8) (осереднення з малим еліпсом мінус осереднення з великим еліпсом) джерела більшості аномалій залягають у певній смузі глибин, ймовірно, в інтервалі параметрів малого еліпса.

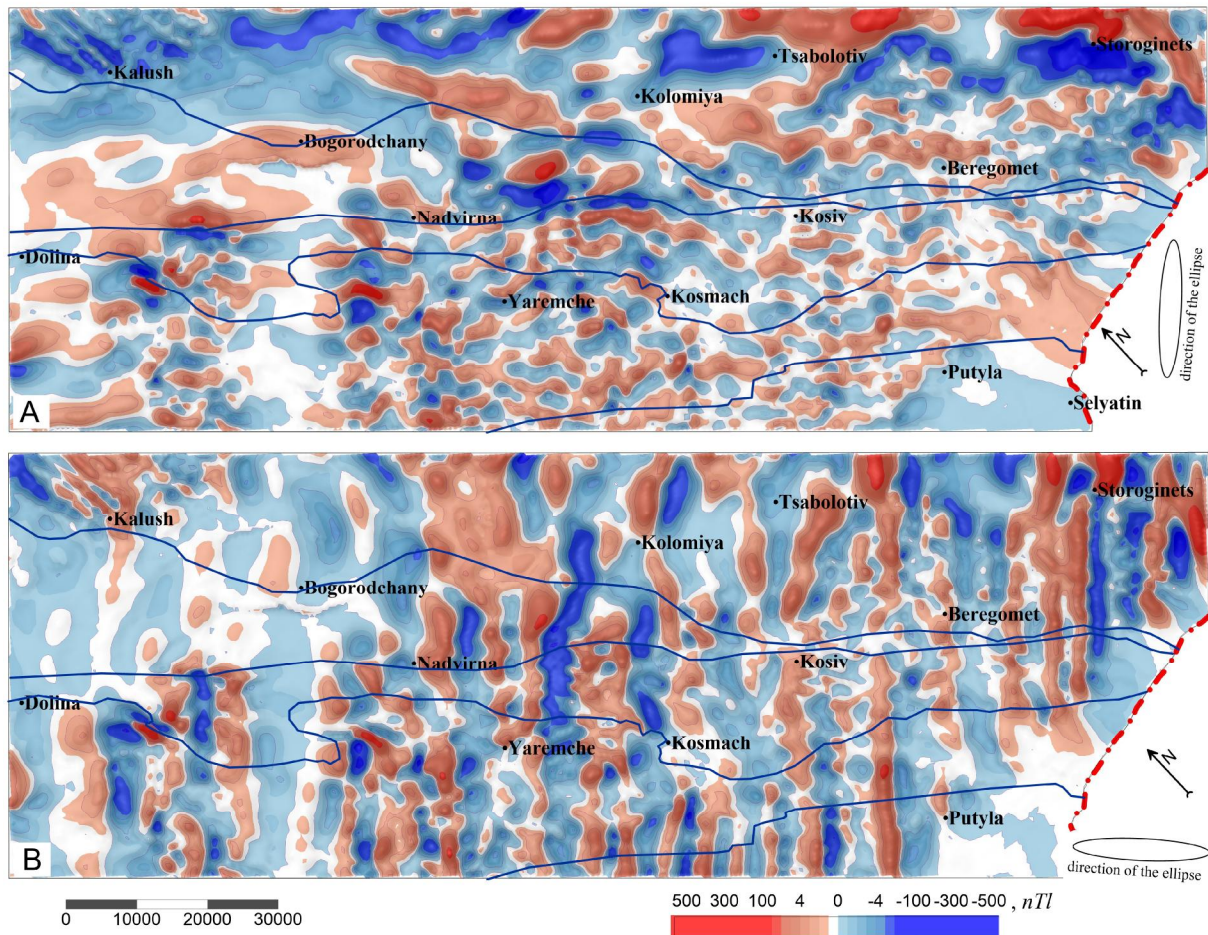


Рис. 15. Локальні анізотропні аномалії (спостережене поле мінус анізотропне осереднення) магнітного поля переважно не північно-східного простягання (А) (спрямування вікна-еліпса північно-східне) та переважно не північно-західного простягання (В) (спрямування вікна-еліпса північно-західне) із наявністю невеликих ізометричних аномалій (розміри яких значно менші за 5000 м)

Смуги додатних (від'ємних) значень різнице-вих аномалій зумовлені протяжними підняттями (заглибленнями) поверхні фундаменту (схил платформи) або підняттями (заглибленнями) протяжних ярусів палеоген-крейдових складок (Складчасті Карпати) (рис. 16, А). Їх немає у трансформанті, що на рис. 16, В. Натомість проявляються великі підняття складних форм (Самбірський покрив), а в межах Складчастих Карпат практично суцільна широка додатна смуга, яка у тилівій частині зони Кросно ускладнена ланцюжками невеликих від'ємних аномалій південно-західного простягання. Лише у південно-східній частині Карпат та перед фронтом Майданського піввікна [Тектоническая карта Украинских Карпат..., 1986] спостерігаються витягнуті у північно-східному напрямку порівняно значні аномалії.

Різницеві анізотропні аномалії гравітаційного поля, які є результатом трансформації у варіанті

вікна-метелика (рис. 6, с, радіуси еліпсів: 500 м – 5000 м), мають містити переважно аномалії, витягнуті у напрямках еліпсів вікна-метелика та більші за велику піввісь еліпсів.

На рис. 17 наведено результати комбінованої ізотропно-анізотропної трансформації (формула емпірична):

$$2 \cdot \underline{U}_R - (\underline{U}_E + \underline{U}_W), \quad (12)$$

де $2 \cdot \underline{U}_R$ – подвійне ізотропне осереднення радіусом R, що дорівнює малій півосі еліпсів; $(\underline{U}_E + \underline{U}_W)$ – анізотропні осереднення за північно-східного та північно-західного спрямування вікон-еліпсів (500×5000 м) – у комбінації є вікном-метеликом (рис. 6, с).

Результатом цієї трансформації є локальні аномалії, джерела яких розташовані у смузі глибин від перших кілометрів до 5000 м (за магнітними аномаліями – до 7000 м).

Аномалії значного простягання, крім протяжних ланцюжків додатних або від'ємних аномалій, практично відсутні. Також істотно послаблені регіональні ізометричні аномалії та невеликі аномалії, розміри яких явно менші за 2000 м. Брахіантиклінальні структури (рис. 1) тільки в окремих випадках корелюють із додатними аномаліями, частіше вони розташовані по їхній периферії (рис. 17).

Структури, розміщені у межах додатних аномалій гравітаційного і магнітного полів, сформовані над виступами фундаменту. Якщо аномалії у плані не збігаються, структури сформовані швидше у результаті насуву в облямуванні виступів фундаменту. Щодо розломів, то, наприклад, поперечні розломи біля м. Богородчани явно продовжуються у межі Складчастих Карпат.

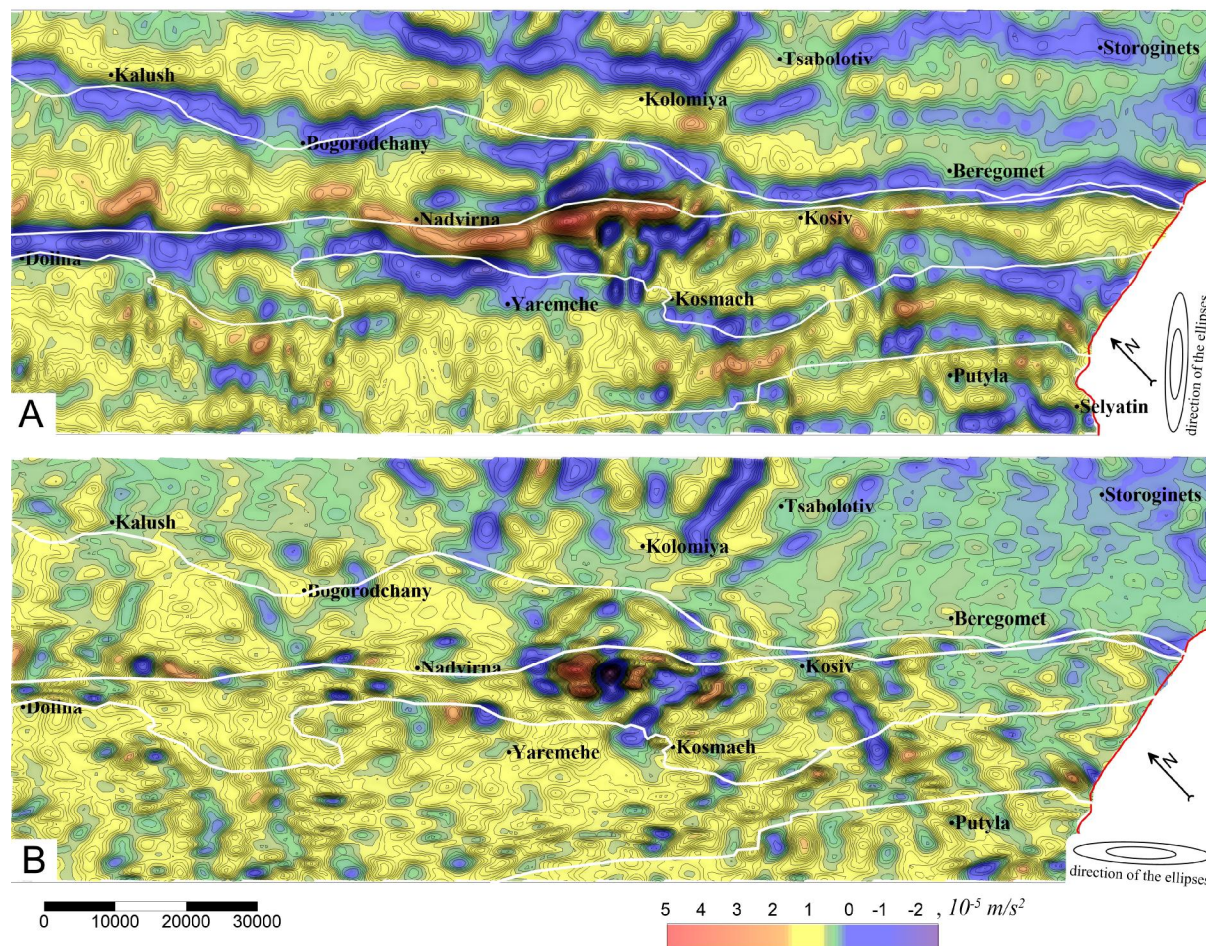


Рис. 16. Різницеві анізотропні аномалії гравітаційного поля: А – спрямування вікон-еліпсів північно-східне; В – спрямування вікон-еліпсів північно-західне

Наведемо результати Т-трансформацій Андрєєва – Клушина (див. ф. 7) у двох варіантах (рис. 18, радіуси еліпсів: 500 м, 5000 м). За першим – головна вісь вікна трансформації (див. рис. 5) має поперечний напрямок (північно-східний) до простягання основних тектонічних зон та глибинних розломів південного сходу Українських Карпат (рис. 1); за другим – напрямком вікна (північно-західний) відповідає простягання тектонічних зон та поздовжніх глибинних розломів. За Т-трансформаціями виокремлюються градієнтні аномалії (або зони підвищених градієнтів), витягнуті у напрямку головної осі вікна.

Гравітаційні Т-аномалії північно-східного простягання (рис. 18, А) відображають мережу поперечних структур та розломів. Тут можна виділити перехідну смугу між схилом платформи та

Складчастими Карпатами. У напрямку на південний захід ближче до краю смуги (лінія фронту Скиб) переважають від'ємні аномалії, що, на наш погляд, є проявом заглиблення платформи під фронт насуву осадового чохла геосинкліналі. За її морфологією схил платформи має значне продовження під Карпатський насув на ділянках Майданського піввікна та Покутсько-Буковинських Карпат. У межах схилу платформи перед Майданським піввікном помітна велика додатна аномалія. Т-аномалії північно-західного простягання (рис. 19, А) відображають ускладнення поверхні фундаменту (депресії, підняття) уздовж простягання тектонічних структур та простягання поздовжніх глибинних розломів (схил платформи) або палеоген-крейдових складок (Складчасті Карпати).

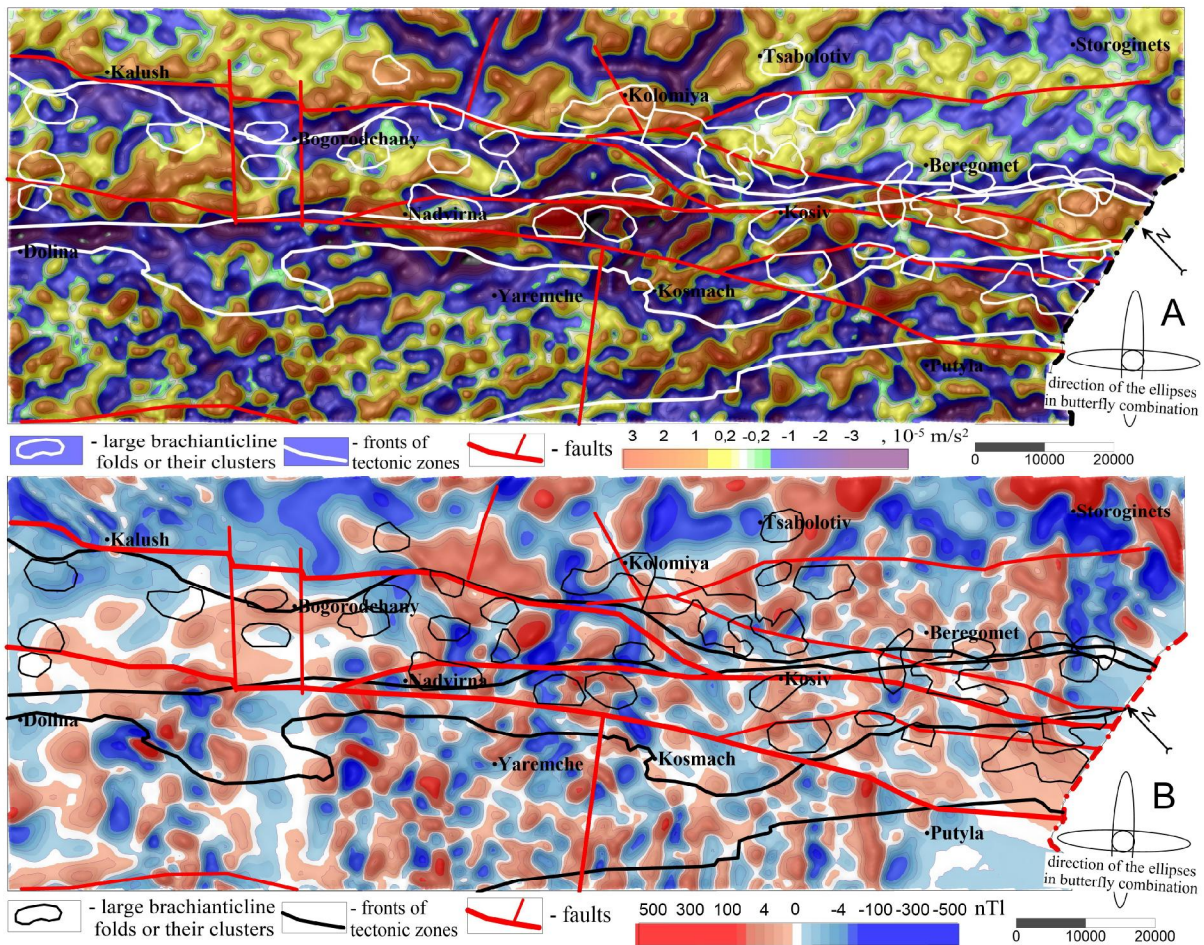


Рис. 17. Локальні різниці аномалії поля сили тяжіння (А) та магнітного поля (В) південного сходу Українських Карпат

У магнітних Т-аномаліях на ділянках Майданського піввікна та Покутсько-Буковинських Карпат у перехідній зоні також помітне розширення від’ємних аномалій та збільшення їхньої інтенсивності (рис. 18, В). У напрямку на Коломийську палеодолину вторгнення пониженого рівня інтенсивності (рис. 19, В, рис. 3) певною мірою корелює зі схемами пониження інтервального опору за даними МТЗ на глибинах 5 км і, особливо, 30 км, які побудували А. М. Кононський та О. С. Гула [Заяць, 2013].

На схемах лінійних аномалій магнітного поля (рис. 15, В; 18, В) простежується вплив розломів поперечного простягання, які, на наш погляд, належать до регіональної системи розломів фундаменту (ротаційна гіпотеза структуроутворення К. Ф. Тяпкіна [Тяпкін та ін., 2000]).

Карти та схеми розломної тектоніки [Тектоническая карта Украинских Карпат..., 1986; Доленко та ін., 1976; Доленко, 1986; та ін.] вказують на складність тектоніки регіону. На схемах мережею глибинних розломів поздовжнього та поперечного напрямків фундамент прогину розділений на блоки (рис. 1, 20).

Мережа лінійних дислокацій, розвинених на північному сході Українських Карпат, найяскравіше проявлена у гравімагнітних локальних анізотропних аномаліях терасового типу (Т-трансформація Андреева – Клушина), які є відображенням глибинних поперечних (рис. 18) та поздовжніх (рис. 19, А) дислокацій або складних форм фундаменту, переважно поздовжнього орієнтування (рис. 19, В), і які певною мірою позбавлені впливу менш значних, неглибоких ускладнень (порівняно з анізотропними аномаліями на рис. 14, 15), що пояснюється конструкцією вікна трансформації (варіації поля у межах центрального еліпса не враховано – формула (7)). На рис. 18, 19 простежується також низка змін у морфології аномалій, наприклад, по лінії Долина – Богородчани, Надвірна – Коломия – Заболотів, Космач – Косів – Берегомет або Богородчани – Надвірна – Яремче. Простягання ліній цих змін приблизно відповідає напрямку Радехівського або Покутського розломів (рис. 20), тобто, можливо, це прояв іншої сітки регіональних розломів, розгорнутих під кутом до мережі поздовжньо-поперечних, що узгоджується із ротаційною гіпотезою К. Ф. Тяпкіна.

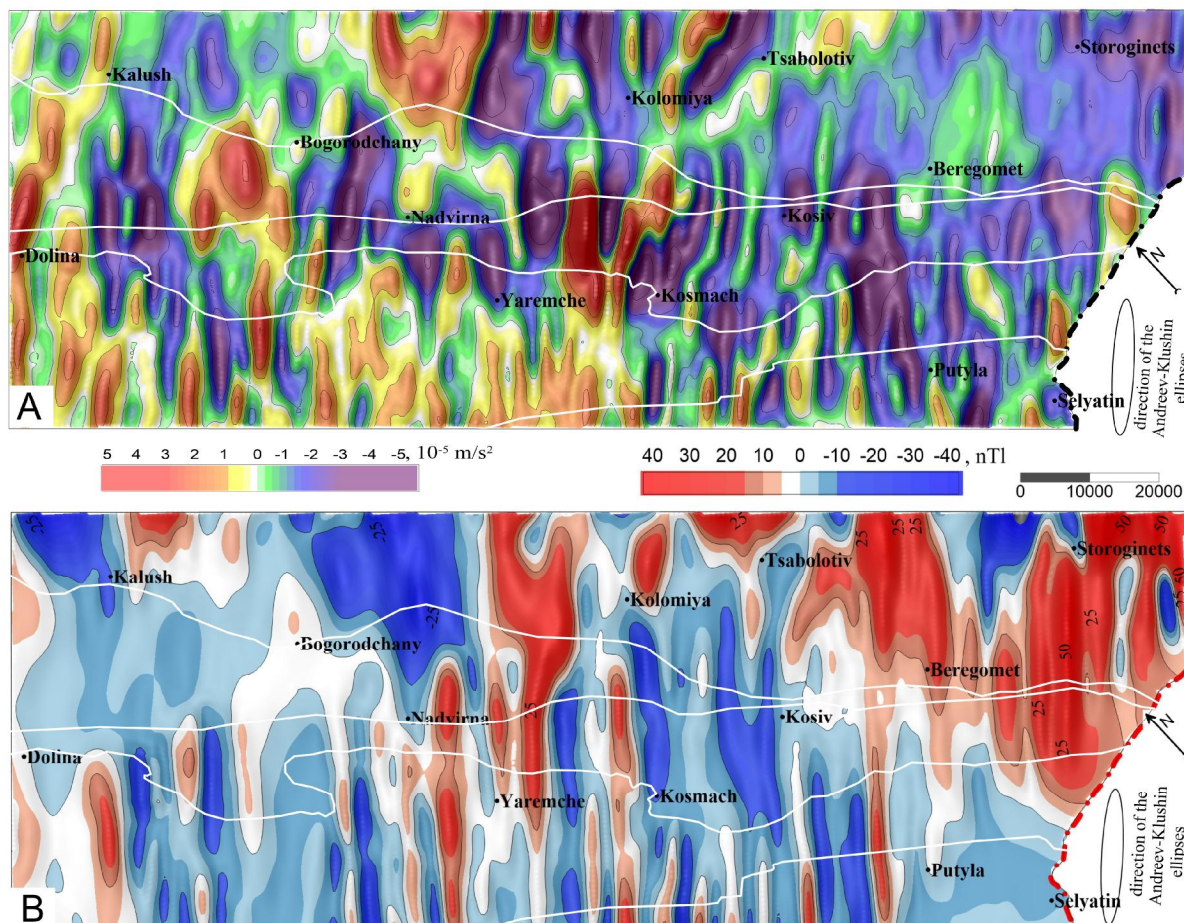


Рис. 18. Результат анізотропної Т-трансформації: гравітаційні (А) та магнітні (В) аномалії терасового типу; спрямування – північно-східне

Структурні особливості, переважно нелінійні, вдало відображені у локальних різницевих аномаліях гравітаційного поля (рис. 16, В) та магнітного поля (рис. 17, В).

Наукова новизна

Надано визначення та розглянуто основні властивості низки трансформацій на підставі анізотропного осереднення. Обґрунтовано геолого-тектонічну інформативність морфології анізотропних трансформацій потенціальних полів у дослідженнях розломної тектоніки Українських Карпат та прилеглих прогинів. Схеми анізотропних гравімагнітних аномалій доповнюють наявні погляди на глибинну будову регіону. Зокрема, за лінійними аномаліями магнітного поля (рис. 15, В; 18, В) простежується ймовірний вплив мережі регіональних розломів, розвинених згідно з ротаційною гіпотезою структуроутворення К. Ф. Тяпкіна.

Практична значущість

Для достовірного виокремлення локальних гравімагнітних аномалій та успішного дослідження їхньої природи необхідно застосовувати трансформації з обґрунтованими характеристиками.

Безперечно, доцільно застосовувати різні способи трансформацій із варіюванням їхніх параметрів. Зіставлення трансформованих полів та пошук спільних морфологічних ознак прояву геолого-тектонічних структур – це дієвий підхід до виявлення та уточнення параметрів цих структур [Андреев, Клушин, 1962].

Застосування анізотропних перетворень потенціальних полів підвищує достовірність і детальність простеження регіональних розломів і геометрії блоків фундаменту, з якими пов'язаний прогноз перспектив на глибинні поклади нафти і газу.

Висновки

Під час вирішення завдань з вивчення глибинної будови, виявлення та картування розломів, простеження тектонічних зон, а також виокремлення структурних форм надзвичайно інформативними є аномальні гравітаційні та магнітні поля. Ступінь достовірності дослідження природи та морфології локальних гравімагнітних аномалій залежить від можливості зіставлення результатів низки трансформацій, зокрема анізотропних, практичне застосування яких теоретично обґрунтовано. Для підвищення змістовності якісної інтерпретації трансформованих полів також потрібно визначати їх

за різними параметрами, зокрема за різними кутами спрямування вікон анізотропних трансформацій. Вочевидь, це є підґрунтям достовірнішого виявлення та простеження тектонічних

елементів у зіставленні локалізованих аномалій (із достатнім масштабом та детальністю) із структурно-тектонічними картами, побудованими за даними сейсмозвідки і буріння.

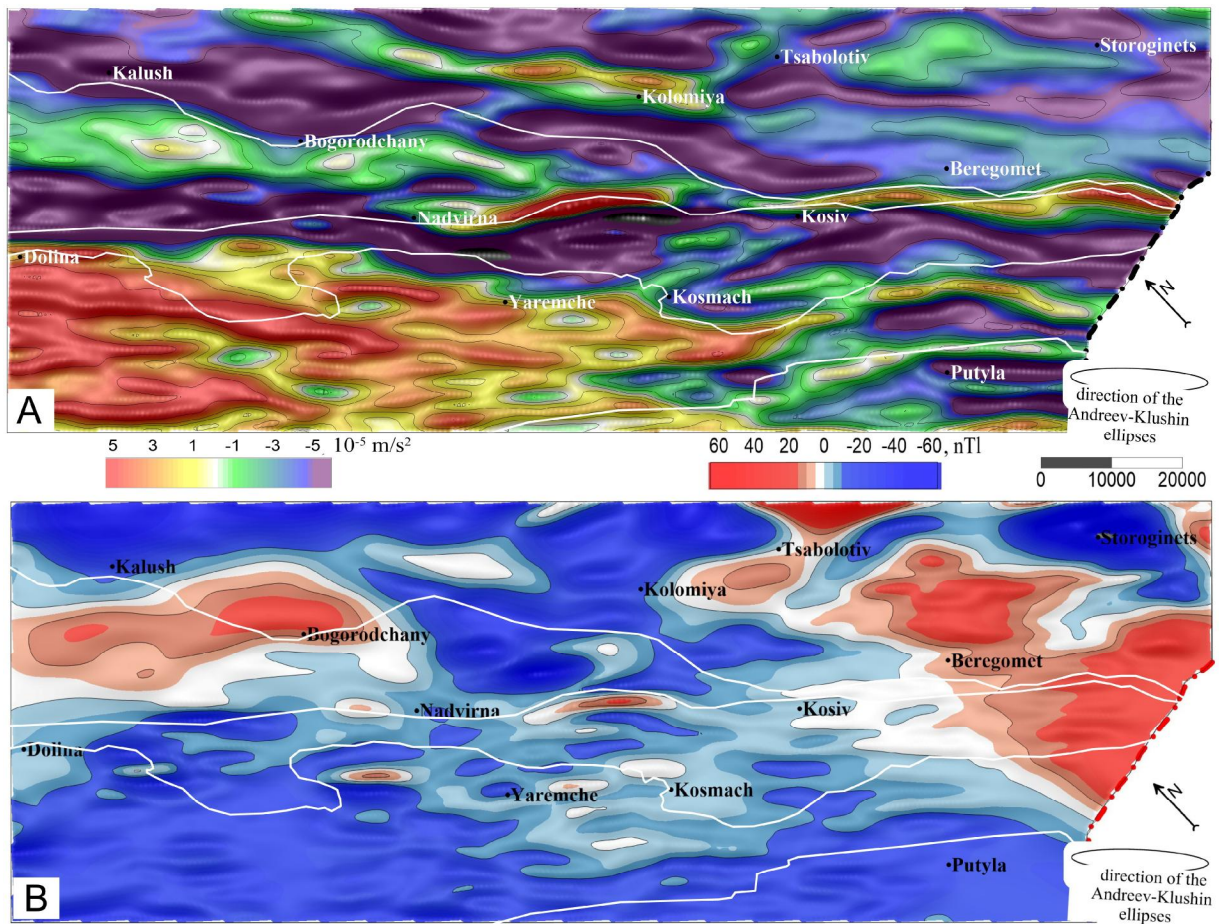


Рис. 19. Результат анізотропної Т-трансформації: гравітаційні (А) та магнітні (В) аномалії терасового типу; спрямування – північно-західне

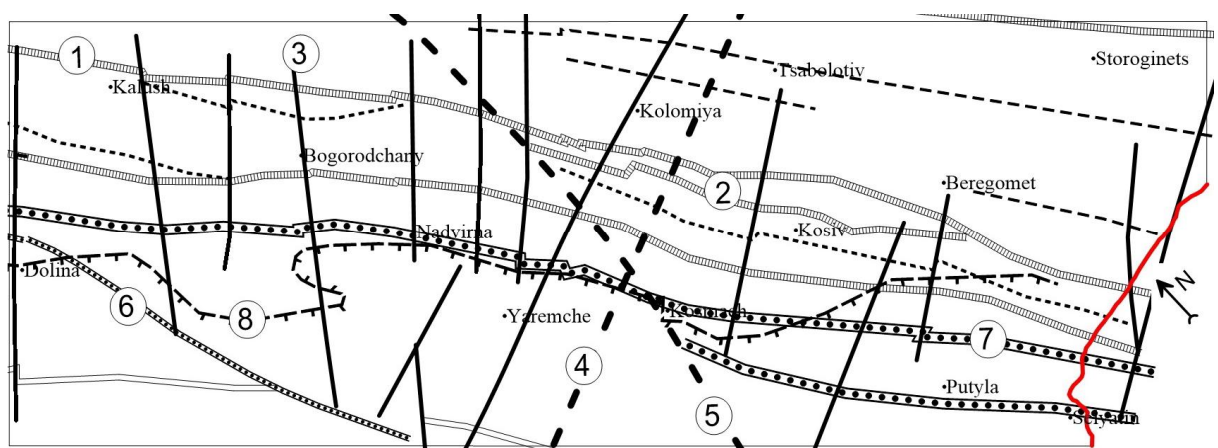


Рис. 20. Схема розломної тектоніки Передкарпатського прогину (фрагмент) [Доленко та ін., 1976], доповнена елементами тектоніки Складчастих Карпат [Доленко, 1986]

Розломи: 1 – Калуський; 2 – Косівський; 3 – Манявський; 4 – Покутський; 5 – Радехівський; 6 – Краковецький; 7 – північно-східна границя Передкарпатського глибинного розлому; 8 – лінія насуну Берегових Карпат (фронт Скиб)

Список літератури

- Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическая интерпретация гравитационных аномалий. Ленинград: Гостоптехиздат. 1962. 495 с.
- Анікеєв С. Г., Максимчук В. Ю., Пилип'як М. М. Гравімагнітна модель Коломийської палеодолини уздовж геотраверсу Надвірна-Отинія-Івано-Франківськ. *Геофизический журнал*. 2019. № 6. Т. 41. С. 73–92.
- Анікеєв С. Г., Мончак Л. С., Степанюк В. П. Відображення у гравімагнітних полях Березівської кільцевої структури (південний захід Коломийської палеодолини). *Геодинаміка*. 2013. № 2 (15). С. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2013.02.078>.
- Демидова М. А., Каламкарров Л. В. Использование преобразований гравитационного поля для изучения нефтегазоносных регионов. Москва: Недра, 1978. 215 с.
- Доленко Г. Н., Бойчевская Л. Т., Килын И. В. и др. Разломная тектоника Предкарпатского и Закарпатского прогибов и ее влияние на распределение залежей нефти и газа. Київ: Наукова думка. 1976. 126 с.
- Доленко Г. Н. Происхождение нефти и газа и нефтегазонакопление в земной коре. Київ: Наукова думка. 1986. 136 с.
- Заяць Х. Б. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту і газ. Львів: *ЛВ УкрДГРІ*. 2013. 136 с.
- Заяць Х. Б., Анікеєв С. Г. Ознаки можливого збагачення корисними копалинами надр феномену Коломийської палеодолини. Комплексное изучение и освоение природных и техногенных россыпей. Труды IV Международной научно-практической конференции (Симферополь – Судак. 17–22 сентября 2007 г.). Симферополь: ПолиПресс. 2007. С. 40–41.
- Карта аномального магнітного поля України / Т. С. Нечаєва, В. М. Гаркавко, Л. М. Шимків, В. А. Єнтін Київ: ПДРГП Північукргеологія, 2002.
- Клушин И. Г., Толстихин И. Н. Выделение линейных тектонических дислокаций на геофизических картах. *Геология и геофизика*. № 6. Изд. СО АН СССР. 1961.
- Матусевич А. В. Гравиразведка Прикаспийской впадины. Алматы: Ливны. 2013. 176 с.
- Маєвський Б. Й., Анікеєв С. Г., Мончак Л. С., Степанюк В. П., Хомин В. Р., Куровець С. С., Здерка Т. В., Манюк М. І. Новітні дослідження геологічної будови і перспектив нафтогазоносності глибоко занурених горизонтів Українських Карпат. Ред. Б. Й. Маєвський. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2012. 208 с.
- Мончак Л. С., Анікеєв С. Г. Відображення тектонічної будови західного регіону України у гравімагнітних полях. *Геодинаміка*. 2017. № 2(23). С. 104–118. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.104>
- Схема гравітаційного поля України / Т. С. Нечаєва, Л. М. Шимків, В. А. Єнтін і ін. Київ: ПДРГП Північукргеологія, 2002.
- Страхов В. Н. Основные направления развития теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. *Геофизика*. 1995. № 3. С. 9–18.
- Тектоническая карта Украинских Карпат. Масштаб 1:200000. Под ред. В. В. Глушка, С. С. Круглова. Киев: УкрНИГРИ. 1986.
- Тихонов А. Н., Буланже Ю. Д. Об осреднении гравитационных полей. *Известия АН СССР. Серия по географии и геофизике*. 1945, Т. 9, № 3, С. 240–260.
- Тяпкін К. Ф., Тяпкін О. К., Якимчук М. А. Основи геофізики. Київ: Карбон Лтд, 2000, 248 с.
- Anikeyev S. G., Rozlovska S. E., Hablovskiy B. B., Shtogryn M. V., Karpenko M. O. Experiments with averaging transformation of gravity field (on the example of the southeast Ukrainian Carpathians). In *Monitoring 2019* (Vol. 2019, No. 1, pp. 1–6). European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903204>.
- Anikeyev S. G., Rozlovska S. E., Hablovskiy B. B., Shtogryn M. V., Karpenko M. O. The experiences with anisotropic averaging transformation of gravity and magnetic fields (on the example of the southeast part of Ukrainian Carpathians). In *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo032>
- Anikeyev S. G., Rozlovska S. E. and Grechukh S. V. Experiments with anisotropies transformations of Andreyev and Klushin (on the example of the gravity and magnetic fields of the southeast Ukrainian Carpathians). In *Geoinformatics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1–6). European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521159>
- Saxov S., Nygaard K. Residual anomalies and depth estimation. *Geophysics*. 18. 4. 1953. 913–928. <https://doi.org/10.1190/1.1437945>

Sergiy ANIKEYEV¹, Svitlana ROZLOVSKA^{1*}

¹ Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, phone, fax (0342) 727121, e-mail: geophys@nung.edu.ua, anikeyevsergiy@gmail.com, ^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-7377-7326>, ^{1b} <https://orcid.org/0000-0002-9259-6774>

ANISOTROPIC TRANSFORMATIONS OF REGIONAL GRAVI-MAGNETIC FIELDS OF THE UKRAINIAN SOUTHEAST CARPATHIANS

The aim of the research presented in this article is to analyze the properties and geological informativeness of the anisotropic transformations of gravitational and magnetic fields, which use averaging procedures, including analysis of Andreev – Klushin’s method. Anisotropic transformations of potential fields are designed to detect and track elongated anomalies or their chains, which are caused by deep linear dislocations in the geological section. The study of the properties of anisotropic transformations is based on the analysis of their depth characteristics and theoretical and practical experiments. The method of analysis of features of fault tectonics reflection in anisotropic anomalies of gravimagnetic fields, in particular, on the example of the South-East of the Ukrainian Carpathians, is based on search of morphological signs of manifestation of deep faults and other long structural-tectonic dislocations in gravitational and magnetic anisotropic anomalies, as well as in tracing these elements based on the comparison of morphology, intensity, size and direction of anisotropic anomalies with published tectonic and geological maps of the region. Results. Definitions and algorithms of such anisotropic transformations as Andreev – Klushin’s methods of anticlinal and terrace types, anisotropic averaging and anisotropic difference averaging are given. A study of the geological informativeness of anisotropic transformations of potential fields on theoretical and practical examples is performed. It is shown that in the morphology of anisotropic gravitational and magnetic anomalous fields in the south-east of the Ukrainian Carpathians long local anomalies are traced, which are caused by fault tectonics, in particular deep longitudinal and transverse faults, as well as linear complications into sedimentary cover. As a result of the analysis of anisotropic anomalous fields, a number of characteristic features of reflection of large tectonic zones, of regional behavior of the foundation surface, deep faults were revealed; on its basis fault tectonics schemes of the South-Eastern region of the Ukrainian Carpathians can be constructed. A significant extension of the foundation of the Eastern European platform from the Maidan’s ledge and the Pokutsko-Bukovynian Carpathians under the Folded Carpathians has been traced. The definition of a number of anisotropic transformations is given and their properties are considered. The geological informativeness of the morphology of anisotropic transformations of potential fields in the study of fault tectonics of the Ukrainian Carpathians and adjacent depressions is substantiated. The use of anisotropic transformations of potential fields will increase the reliability and detail of tracing deep faults, as well as other linear dislocations both in the foundation and in the sedimentary cover. The study of fault tectonics is an important factor in the successful solution of problems in the search and exploration of areas which are promising for oil and gas deposits.

Key words: Precarpathian Depression; fault tectonics; linear dislocations; transformation of gravity and magnetic fields; anisotropic averaging; deep characteristics of transformations; anisotropic anomalies.

Надійшла 14.10.2021 р.