

УДК 550.831

## ПРО ВИСОКОТОЧНІ ГРАВИМЕТРИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ І ЇХ ПЕРВИННУ ОБРОБКУ

*Гравіметричним роботам  
В.Я.Біліченка присвячується*

*С.Г.Анікєєв*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067  
e-mail: public@ifdtung.if.ua*

*Решение сложных задач детализации моделей строения геологических сред, поиск и разведка полезных ископаемых, решение экологических и инженерных задач предполагает использование высокоточных геофизических наблюдений, в том числе и гравиметрических. Разработанный В.Я.Биличенко способ позволяет повысить предельную точность съемки поля силы тяжести гравиметрами типа ГАК до 0.02-0.04 мГл.*

*The decision of complex tasks of detailed elaboration of models of a structure of a geological medium, search and investigation of minerals, the decision of ecological and engineering tasks assumes use of precision geophysical exploration, including gravity observations. Developed by Victor Bilichenko the way of observation of the gravity field by simple gravimeters such as GAQ has allowed increase its limiting accuracy up to 0.02-0.032 mGal.*

**Актуальність.** Практика геологічних досліджень, пошук і розвідка антиклінальних структур, тектонічних порушень і дислокацій, з якими пов'язані родовища корисних копалин, все більшою мірою залежать від проведення детальних високоточних геофізичних спостережень, у комплексі яких чільне місце посідає гравіметрія. Зростання ролі ефективності і економічності комплексу методів геофізичної розвідки пов'язується як із ускладненням геологічних завдань, так і з розширенням області їхнього застосування. Це контроль стану родовищ корисних копалин, що експлуатуються, рішення таких екологічних проблем, як вияв і контроль розвитку карстових утворень на родовищах сірки і калійної солі, прогноз зсувів і таке інше. На відміну від регіональних досліджень, коли задані площі треба покрити геофізичною зйомкою з певною середньою похибкою, детальні дослідження призначені для виявлення аномалій геофізичних полів з максимально можливою точністю. Вони мають бути відмінні і за особливостями методики польових спостережень. На жаль і сьогодні на рішення виробничо-методичних питань детальної зйомки, а також на контроль та оцінку гравіметричних робіт з боку відповідних організацій значною мірою впливають вимоги до загальної зйомки.

**Принцип максимальної локальної точності.** Геологічна ефективність детальної гравірозвідки перш за все залежить від достовірності простежування локальних аномалій від точки до точки, а не від рівномірної точності в межах профілю чи площі спостережень. Спосіб високоточних спостережень має задовольняти принцип максимальної локальної точності [1], за яким нелінійне зміщення нуль-пункту можна визначити за спостереженнями у рейсі і за яким є 100% контроль точності спостережень. Щодо останнього, то Маловічко О.К., автор відомих

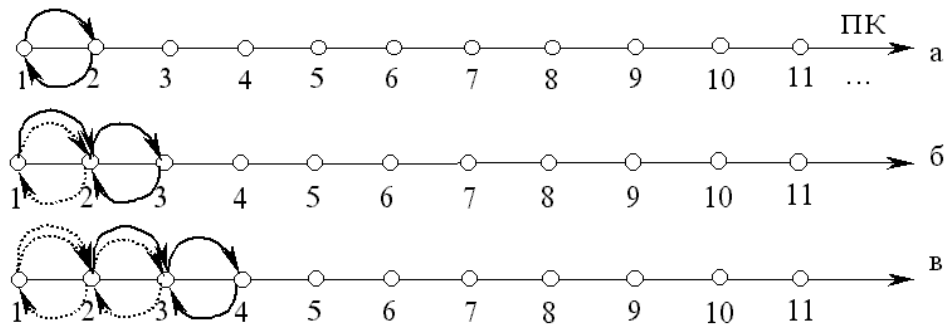
навчальних і наукових видань з гравірозвідки, категорично зазначає: "При методах наблюдений, используемых в региональной съемке, оператор не может гарантировать, что во всех точках рейса аномалии получены с необходимой точностью. В детальной гравиразведке применение методов, которые могут дать «выскоки» аномалий, представляется совершенно недопустимым" [1, стор. 7]. Відповідно опорна мережа повинна мати дещо інше призначення. Її щільність порівняно з регіональними дослідженнями має бути меншою. Технічна інструкція з гравіметричних робіт, в принципі, допускає такі відхилення [2, §34]. Зауважимо, що відносно високої локальної точності спостережень можна досягти за допомогою методики, що рекомендується інструкцією, але у цьому випадку слід проводити хоча б двократну зйомку зі 100% контролем точності і 100% відпрацюванням помилкових вимірювань, що не гарантує її економічної ефективності.

В статті розглядається спосіб спостережень Біліченка В.Я., який відповідає принципу максимальної локальної точності. Важливо, що висока точність спостережень ( $0,02 \div 0,04 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ ) досягається з використанням кварцових гравіметрів, наприклад, типу ГНУ-КВ. Первинну обробку даних спостережень від польових журналів до визначення аномалій сили тяжіння в редакції Буге пропонується виконувати за допомогою комп'ютерної програми, розробленої автором статті.

**Спосіб гравіметричних спостережень.** Біліченка В.Я. передбачає повторні спостереження з поступовим переміщенням по пікетах у межах рейсу. Це дає змогу визначати зміщення нуль-пункту і виконувати відповідний контроль в міру проведення спостережень, що і рекомендовано при пошуково-розвідувальних зйомках [2]. Рейси можуть містити довільну кількість профілів, ділянки з яких можуть бути включені у різні рейси, але кількість пікетів має бути не

менша трьох. На першому і останньому пікетах рейсу спостереження двократні, на інших – трикратні. Для зведення спостережень за площею

льної зйомки, то тут опорна мережа допомагає ліквідувати накопичення ймовірних помилок спостережень. Щоправда, для цієї мети можна



Умовні позначення: а, б, в – послідовні кроки спостережень;

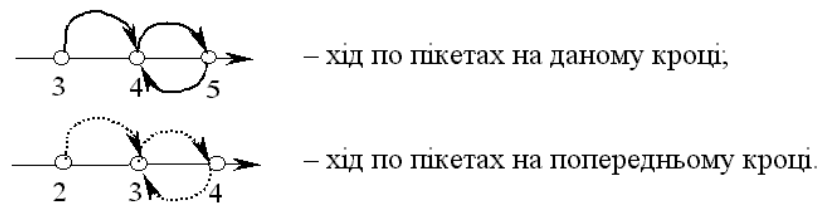


Рисунок 1 – Порядок гравіметричних спостережень

до одного рівня кожний рейс, крім першого, починається з пікету будь-якого попереднього рейсу. Збільшення кількості спільних пікетів із різними рейсами підвищує точність зведення і загальну точність спостережень. При зйомці за площею бажано проектувати замкнуті рейси, а при профільних зйомках рекомендується перекриття рейсів більше, ніж одним пікетом. Хід оператора вздовж рейсу зображено на рис. 1. Якщо при зйомці використовується декілька гравіметрів, то мають перекриватися спільними пікетами не їхні рейси, а ділянки спостережень окремими рейсами (частинами рейсів) або достатньою кількістю пікетів різних рейсів.

Спосіб обґрунтований результатами великої кількості детальних зйомок за різними площами [3÷6 та ін.].

**Опорна мережа.** Інструкція з гравіметричних робіт визначає призначення опорної мережі, яке цілком відповідає особливостям регіональної зйомки: опорна мережа забезпечує можливість визначення поправки за зміщенням нуля-пункту, підвищенням загальної точності зйомки, зведенням спостережень до єдиного рівня (умовної поверхні геоїду) і прив'язкою її до державної гравіметричної мережі.

Спосіб Біліченка В.Я. забезпечує неперервне врахування нелінійного зміщення нуля-пункту по рядових пікетах рейсу. Далі, інструкція [7] для зйомок масштабу 1:25000 й крупніше на площах, менших 70 км<sup>2</sup>, дає змогу визначати аномалії в системі умовного рівня.

Однак опорна мережа, хоч і менш щільна, потрібна. Зйомки крупного масштабу накопичуються, і їх зведення до рівня державної опорної мережі буде актуальним. Щодо самої дета-

використовувати додаткові (контрольні) рейси, які перетинають мережу основних, а також зйомку можна виконувати замкнутими рейсами.

**Зміщення нуля-пункту.** Відомо, що зміщення нуля-пункту гравіметрів типу ГАК має складний характер. Тільки приблизно можна вважати зміщення нуля-пункту лінійним за проміжки часу 1÷2 годин (відстань між опорними пунктами згідно з інструкцією визначається за цією умовою). Реально зміщення нуля-пункту ускладнене періодичною складовою ( $\pm 0.01 \div 0.02 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>), а також неконтрольованими стрибками тієї ж амплітуди. Тобто високочотні спостереження за методикою, прийнятою згідно з інструкцією, не можуть бути гарантовані навіть при дво- чи трикратних спостереженнях. На противагу цьому спосіб Біліченка В.Я. дає можливість контролювати характер зміщення нуля-пункту від пікету до пікету спостережень.

**Робота з гравіметром.** Саме спосіб детальної зйомки має забезпечувати повний контроль за точністю спостережень. Відтак є можливість формувати додаткові рейси по усіх відбракованих пікетах за площею спостережень, у крайньому разі, коректувати значення спостережень під час обробки. Таким чином, оператору нема потреби гарантувати якість своєї роботи. Вона визначається під час обробки і впливає на терміни проведення й обробки даних спостережень загалом. Для підвищення економічності польових робіт оператор буде прагнути дотримуватись вимог способу спостережень, ретельно виконувати спостереження з дотриманням відомих вимог: з введенням гравіметра в робочий режим, вивіркою його рівнів на початку робочого дня та перед рейсами і т. ін. [1]

Обробка рейсів спостережень, що реалізована комп'ютерною програмою, складається з таких кроків:

1) Визначення перевищень поля за пікета-

4) Послідовне зведення локальних графіків зміщення нуля-пункту до рівня кривої, побудованої для попередніх пікетів рейсу.

Приклад порівняння за часом кривої змі-

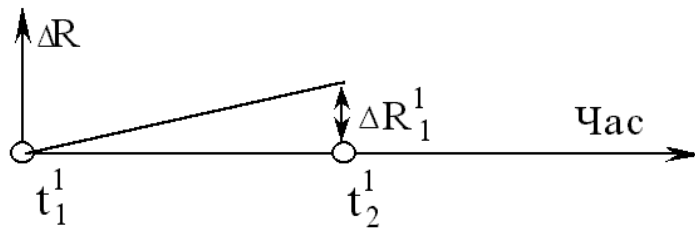


Рисунок 2 – Зміщення нуля-пункту  $\Delta R$  для першого та останнього пікету в рейсі

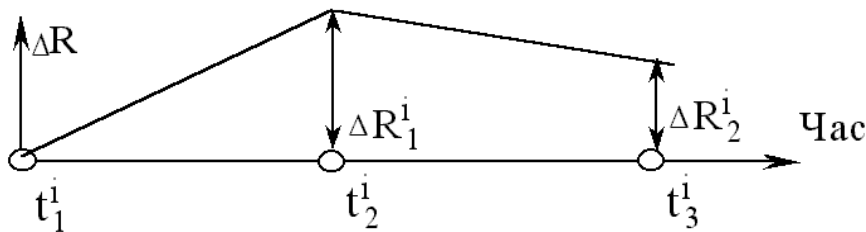


Рисунок 3 – Зміщення нуля-пункту  $\Delta R$  для i-ого пікету в рейсі

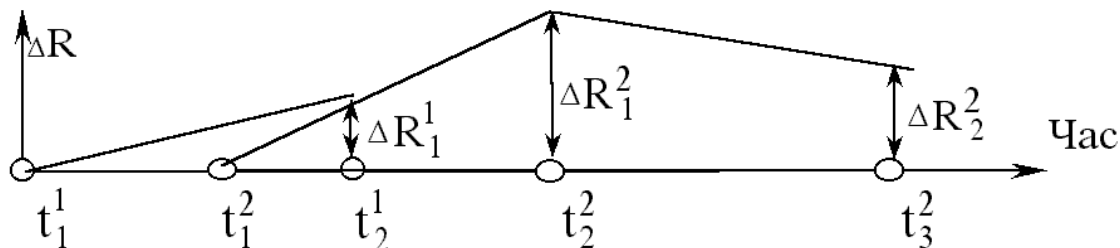


Рисунок 4 – Порівняння за часом кривих зміщення нуля-пункту на першому і другому пікетах

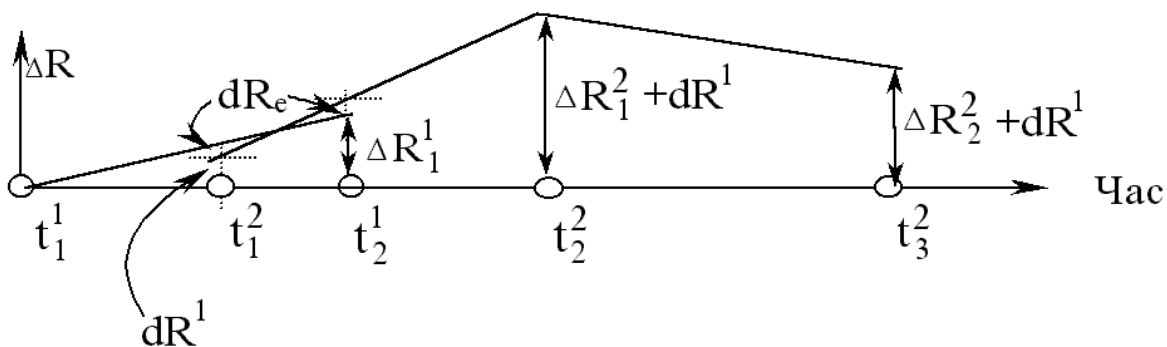


Рисунок 5 – Зведення кривої зміщення нуля-пункту на другому пікеті до рівня кривої першого пікету

ми спостережень відносно першого в рейсі.

2) Групування повторних спостережень за зростанням часу для кожного пікету.

3) Побудова локальних графіків зміни значень перевищень поля по пікетах, зумовлених зміщенням нуля-пункту і похибками спостережень.

Приклади локальних графіків зображено на рис. 2, 3. Всі графіки починаються з нульової позначки, яка відповідає часу першого виміру.

щення нуля-пункту  $\Delta R$  на другому пікеті з кривою зміщення нуля-пункту на першому пікеті зображено на рис. 4. Зведення цих кривих до одного рівня зображено на рис. 5.

Крива зміщення нуля-пункту  $\Delta R$  на другому пікеті зводиться до рівня кривої першого пікету рейсу так, щоб їх розбіжність  $dR_e$  у моменти часу  $t_1^2$  і  $t_1^1$  була однаковою. Розрахунок

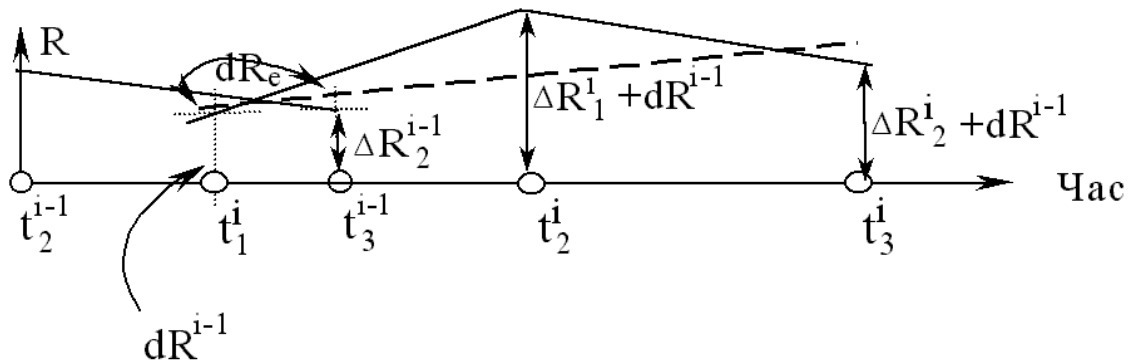


Рисунок 6

$dR_e$  і рівня зміщення  $dR^1$  кривої другого пікету, як видно з рис. 5, не є складним. У моменти часу  $t_1^1$  і  $t_2^1$  спільна крива  $\Delta R$  визначається, як середня з двох.

Аналогічно коректуються локальні криві зміщення нуль-пункту  $\Delta R$  на інших пікетах.

У випадках, коли вочевидь є вплив помилок спостережень чи робота гравіметра нестабільна (наприклад, знак нахилу кривої зміщення нуль-пункту змінюється від одного виміру до іншого), локальна крива зміщення випрямляється приблизно так, як вказано пунктирною кривою на рис. 6.

За такою побудовою кривої зміщення нуль-пункту в рейсі коректуються перший і третій виміри на пікеті, тобто дещо послаблюються похибки вимірювань.

5) Введення поправки на зміщення нуль-пункту по пікетах рейсу. Значення поправки  $\Delta R_1^i$  знімається з спільної кривої  $\Delta R$  на момент часу  $t$  спостереження на  $i$ -тому пікеті.

6) Визначення середніх значень перевищення поля по пікетах, чим і завершується обробка рейсу.

**Зрівноважування рейсів спостережень.** Перевищення поля сили тяжіння по пікетах кожного наступного рейсу зводиться до рівня попереднього. Зрозуміло, що чим більше пікетів, за якими перекриваються рейси, тим точніше зведення рейсів до одного рівня. Підвищення точності зведення можна досягти перекриттям окремими рейсами не одного, а декількох попередніх. Тоді зведення рейсів найпростіше виконати за допомогою ітеративного зрівноважування, розробленого для опорних мереж [8]. Спосіб не обмежений ні кількістю пікетів, якими перекриваються рейси, ні кількістю рейсів, що перекриваються одним рейсом. Опорна мережа та контрольні рейси дають змогу підвищити точність зрівноважування рейсів.

**Введення поправки Буге** виконується за відомою формулою [2, 7], але після сортування даних спостережень по профілях за зростанням пікетів.

**Карти і графіки поля сили тяжіння,** рельєфу місцевості та графіки зміщення нуль-пункту по рейсах будуються за сформованим списком даних.

**Оцінка точності і якості спостережень.** Спосіб оцінки точності, що ґрунтується на розрахунках середньоквадратичного відхилення  $\rho$  (математичне визначення: відстань в евклідовому просторі  $R^n$  [9, стор. 45-46], де  $n$  – кількість контрольних спостережень) і який використовується при регіональних дослідженнях, для детальних зйомок є недостатнім [1].

За повторними спостереженнями по пікетах рейсу можна визначити відхилення  $\rho$  до врахування зміщення нуль-пункту та після нього. Це дає надійну оцінку інтервалу, в межах якого є реальна похибка (повторні спостереження виконуються одним оператором, тим самим гравіметром і через невеликий проміжок часу, тобто вони є залежними).

По-друге, за даними повторних спостережень по пікетах у різних рейсах, спостережень по опорній мережі й контрольних рейсах можна визначити  $\rho$ , яке буде близьким до реального (але середньоквадратичного) відхилення.

По-третє, є оцінка точності спостережень по кожному пікету. Якщо відхилення  $\rho^1$  (відстань у просторі дійсних чисел  $R^1$ ) більше наперед заданого числа, то такий пікет й значення відхилення заносяться в список помилок. За списком помилок можна визначити максимальне відхилення  $\rho_0^n$  (відстань у просторі  $R_0^n$ ).

Зрозуміло, що якість спостережень можна оцінити за розмірами списку помилок і за значеннями останніх. Однак основне призначення списку — інформація для аналізу “викидів” (відносно пікетів, розташованих поряд, і відносно двох інших спостережень на тому ж пікеті), які у деяких випадках можна коректувати з урахуванням характеру зміщення нуль-пункту в околі “викиду”. Особливе значення має можливість аналізу “викидів” на пікетах, які є спільними в різних рейсах.

**Коректування спостережень за списком помилок.** Не завжди є можливість оперативно виявити всі помилки спостережень і провести спостереження в додаткових рейсах. Після польових робіт коректування спостережень краще за все виконувати на основі візуального аналізу результатів обробки: карт і графіків

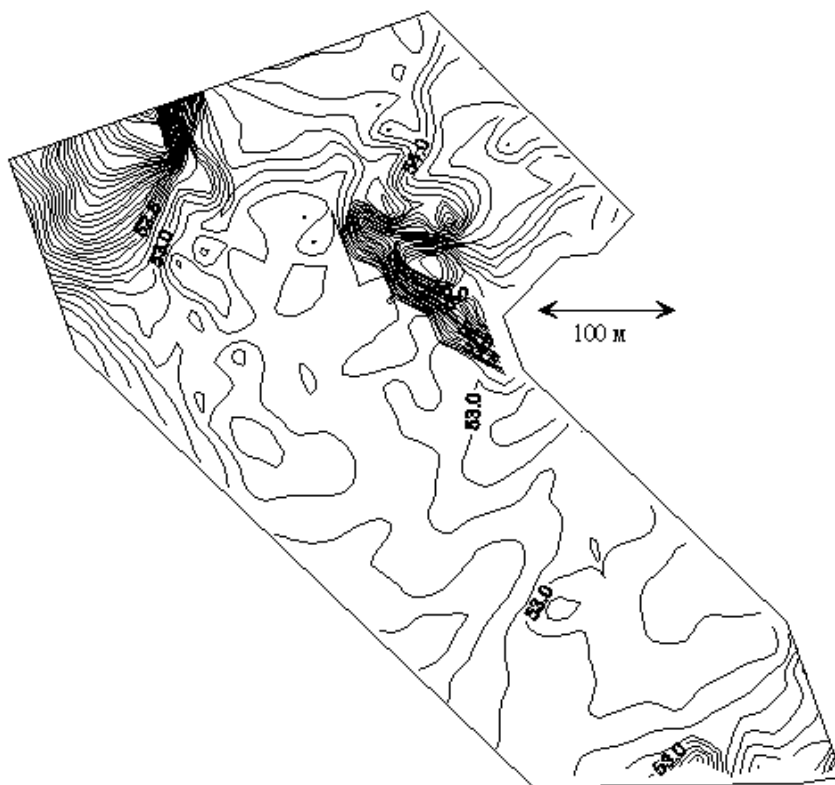


Рисунок 7 — Карта аномального поля сили тяжіння до корекції помилок спостережень

аномального поля сили тяжіння в редукції Буге, а також їхнього порівняння з планом рейсів. Відсутність кореляції між картою і планом свідчить про якісну зйомку загалом. Інакше, слід провести ретельний аналіз спостережень з метою виявлення помилок, особливо на початку кожного рейсу (наприклад, коли гравіметр не був введений у робочий режим), і їхньої корекції. Так, кореляція між картою і планом рейсів часто зумовлена помилками у зведенні рейсів до єдиного рівня. Коректувати рівні рейсів, на думку автора, можна, але введенням тільки лінійної складової за принципом мінімальної кореляції морфології поля з планом рейсів.

За способом Біліченка В.Я. спостереження по пікетах у рейсі (і зведення рейсів) є залежними. Помилки спостережень впливають на значення поля в наступних пікетах і рейсах. Тому при виявленні помилок слід коректувати не значення аномального поля за картою чи графікою, а дані з польового журналу. Відтак обробку слід виконувати повторно (і, можливо, неодноразово), що дуже складно без її автоматизації.

**Комп'ютерна програма обробки спостережень** створена як компонент до системи "Complex.Gravity" [10, 11] і використовує її структуру файлів та засоби захисту даних від випадкових помилок користувача. Для побудови графіків та карт полів і рельєфу дані готуються у файлах у певних форматах. Графічні побудови виконуються в стандартному графічному редакторі.

Вихідні дані для обробки готуються у двох піддиректоріях. Перша містить файли-рейси,

формати яких відповідають формі польових журналів. Друга — файли-профілі альтитуд. Пікети спостережень мають або умовну нумерацію з заданим кроком, або їхнє розташування задане координатами по площі (профілю) спостережень. Результати обробки заносяться у файли нових піддиректорій: зміщення нуля-пункту в рейсах, аномалії поля за профілями та окремо за площею спостережень. Остання піддиректорія містить дані і для побудови карти альтитуд. Окремим є файл списку помилок. Робота з програмою, структура файлів та формати даних описані в інструкції користувача.

**Практичний приклад обробки.** На одному з сірчаних родовищ, де вивчався розподіл сірки в продуктивному пласті після видобутку її методом підземної виплавки, проведена високоточна зйомка гравітаційного поля з кроком 20 м. Складні умови польових робіт (заболоченість, потічки, рівчаки) зумовили контури площі гравіметричних спостережень, фрагмент якої зображено на рис. 7, а також нерівномірну точність зйомки, що було зумовлено поділом площі на ділянки, які відпрацьовувались у різний час.

У результаті комп'ютерної обробки, аналізу морфології аномального поля сили тяжіння й рельєфу місцевості та корекції виявлених помилок, що було виконано у декілька циклів, побудована карта аномального поля сили тяжіння в редукції Буге (рис. 8).

Детальні дослідження зумовлені особливими геологічними завданнями і, певно, мають відрізнятись від регіональних й за принципами геофізичних спостережень. Поза сумнівом, до-

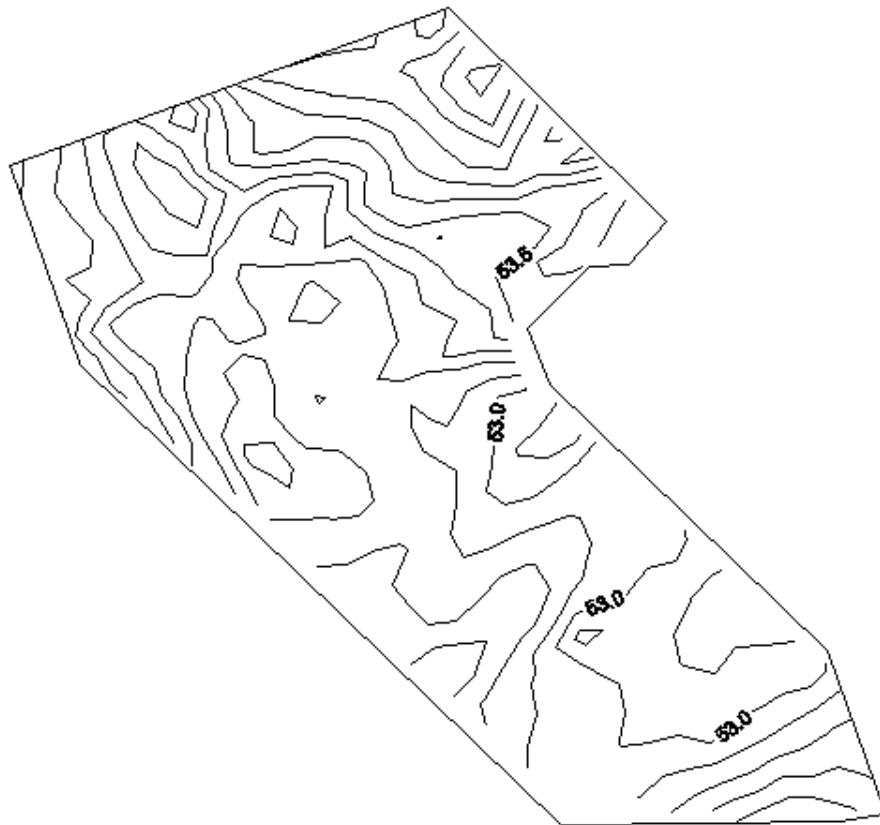


Рисунок 8 — Карта аномального поля сили тяжіння після корекції помилок спостережень

тримання *принципу максимальної локальної точності* тільки розширює можливості геологічної інтерпретації гравіметричних матеріалів.

За межами даної роботи залишилися поправки до спостережень, які при детальних роботах є актуальними. Тут слід послатися на роботу [1].

#### Література

1. Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. – М.: Недра, 1979. – 192 с.

2. Техническая инструкция по гравиметрической разведке. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 70 с.

3. Биличенко В.Я. и др. Отчет о гравиметрических исследованиях, проведенных на Калушской площади (гравиметрической партией № 61-75). – Львов: Фонды ЗУГРЭ, инв. № 1177, 1975.

4. Биличенко В.Я. Комплексные геофизические (электроразведочные и гравиметрические) и геохимические исследования с целью выявления нефтегазоперспективных зон и объектов на Журавниковой площади во Львовском палеозойском прогибе: Отчет. – Львов: Фонды ЗУГРЭ, инв. № 1692, 1988.

5. Біліченко В.Я. Звіт про комплексні геофізичні (електророзвідка, гравіметрія) і геохімічні дослідження на Володимирській площі,

виконані партією 63\88. – Львів: Фонди ЗУГРЕ, інв. № 1733, 1989.

6. Біліченко В.Я. Звіт.

7. Инструкция по гравиметрической разведке. – М.: Недра, 1975. – 88 с.

8. Анікеєв С.Г., Степанюк В.П. Гравірозвідка і магніторозвідка: Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 247 с.

9. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1972. – 496 с.

10. Анікеєв С.Г. Комп'ютерна система рішення прямих та обернених задач гравірозвідки для 2D/3D моделей складнопобудованих середовищ // Розвідка і розробка нафтових та газових родовищ: Зб. наукових праць ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1997. – Вип.34. – С. 57-63.

11. Анікеєв С.Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при довільній будові геологічних середовищ: Автореф. дисс.... канд. геол. наук: 04.00.22. – К., 1999. – 242 с.