

Гравімагнітна модель Коломийської палеодолини уздовж геотраверсу Надвірна — Отинія — Івано-Франківськ

С. Г. Анікеєв¹, В. Ю. Максимчук², М. М. Пилип'як², 2019

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна

²Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
Львів, Україна

Надійшла 21 серпня 2019 р.

Цель работы — построение комплексной сейсмогравимагнитной модели геологического разреза по геотраверсу СГ-1 (67) (Надворная—Отиния—Ивано-Франковск) и оценка перспектив нефтегазоносности Коломыйской палеодолины. Методика исследований основана на анализе аномального гравитационного и магнитного полей и построении согласованных плотностной и магнитной моделей геологического разреза. Локальные аномалии выделены методами трансформаций. Моделирование строения геологического разреза выполнено методами решения прямых и обратных задач гравиразведки и магниторазведки, которыми реализованы идеи критериального подхода к построению оптимальных моделей геологических сред, согласованных с наблюдаемыми геофизическими полями, что не противоречит данным бурения и сейсморазведки. Достоверность методики интерпретации гравимагнитных материалов достигается геологической подчиненностью: условием максимального учета данных сейсморазведки и геолого-тектонических карт. Построена согласованная плотностная и магнитная модель геологической среды вдоль сейсмогеологического профиля СГ-1 (67). Детализировано распределение плотностей и намагниченности горных пород осадочного чехла и блоков фундамента до глубин 20 км. В результате моделирования в определенных стратиграфических комплексах выявлены зоны, аномальные по плотности и намагниченности горных пород. Зоны разуплотнения в пределах положительных структурных форм идентифицированы как перспективные. Также подтверждена высокая вероятность наличия глубинных интрузий, прогнозируемых по материалам сейсморазведки в пределах погребенной тектонической зоны и достигающих подошвы осадочного покрова.

Выполненный анализ морфологии гравитационных и магнитных аномалий и гравимагнитное моделирование позволили уточнить геологическое строение разреза Коломыйской палеодолины и оценить перспективы нефтегазоносности ее отдельных участков.

Ключевые слова: Коломыйская палеодолина, глубинный сейсмогеологический разрез, аномалии гравитационного и магнитного полей, прямая и обратная задачи гравимагниторазведки, плотностная и магнитная модели.

Вступ. Коломийська палеодолина вже тривалий час привертає увагу дослідників як перспективний об'єкт для проведення нафтогазопошукових робіт. Вона розміщується у південно-східній частині Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину (рис. 1) — основної нафтогазос-

ної геолого-тектонічної структури Карпатської нафтогазосної провінції.

Глибинну будову палеодолини досліджували переважно методами сейсморозвідки, за результатами яких встановлено складний структурно-блоковий характер її донеогенової основи. Характерни-

ми ознаками морфології цієї поверхні є складні ерозійні форми врізів та виступів. У неогеновому комплексі виявлено складні антиклінальні та неантиклінальні форми, успадковані від донеогенового рельєфу. Зазначені об'єкти становлять інтерес для здійснення нафтогазопозукових робіт, оскільки на схилах палеовиступів мезозойської поверхні у перехідній зоні від глибоководного до мілководного басейну осадоагромадження у неогені формувались пачки пісковиків, у яких могли генеруватися поклади вуглеводнів [Заяць та ін., 2005; Заяць, 2013]. У межах Коломийської палеодолини відкрито кілька газових родовищ та прогнозується відкриття нових родовищ нафту і газу.

Невисока ефективність нафтогазопозукових робіт у Карпатському регіоні зумовлена не лише складною геологічною будовою, а й труднощами інтерпретації матеріалів сейсморозвідки під час оцінювання перспективності об'єктів та підготовки їх до пошукового буріння. У цих умовах зростає роль інших не сейсмічних методів (граві-, магніто- і електророзвідки) вивчення геологічного розрізу. Серед сучасних геолого-геофізичних методів досліджень глибинної будови геологічних середовищ важливе місце займають густинне та геомагнітне моделювання [Старостенко, 1978; Yegorova et al., 1997; Grabowska, Wojdys, 2001; Кобрунов та ін., 2005; Булах, 2010; Vocin et al., 2013; Šefara et al., 2017; Гінтов та ін., 2018 та ін.]. Моделювання ґрунтується на розв'язанні прямих та обернених задач граві- і магніторозвідки з урахуванням даних буріння, сейсморозвідки та інших геолого-геофізичних матеріалів. Інтерпретаційні можливості гравірозвідки і магніторозвідки ґрунтуються на роботах В. І. Старостенка, Є. Г. Булаха, С. С. Красовського, В. М. Страхова, О. І. Кобрунова та ін.

Геогустинне моделювання для Коломийської палеодолини виконано С. Г. Анікеєвим, В. Ю. Максимчуком, М. М. Пилип'як та отримано нові дані щодо глибинної будови цієї палеодолини уздовж геотраверсу СГ-1 (67) [Анікеєв та ін., 2016, 2017]. Подальше підвищення ефективності гео-

фізичних досліджень будови цього регіону пов'язуємо із залученням даних магніторозвідки та побудови комплексних гравімагнітних моделей геологічного розрізу земної кори.

Мета статті — створення сейсмогустинно-магнітної моделі геологічного розрізу за геотраверсом СГ-1 (67) (Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ) та оцінювання перспектив нафтогазоносності Коломийської палеодолини за результатами моделювання та аналізу аномальних гравімагнітних полів.

Геолого-тектонічна будова Коломийської палеодолини (за даними сейсморозвідки). Складну ерозійну поверхню морфоструктури палеодолини зображено на структурно-тектонічній карті, яку побудовано за даними буріння та сейсморозвідки (рис. 2). Центральне палеорусло палеодолини у районі с. Коршів має субмеридіональний напрямок і, очевидно, успадковує напрямок Рава-Руського розлому [Заяць та ін., 2005]. На північному заході центральне палеорусло повертає від смт Отинія на південний захід до с. Середній Майдан. На південному сході від м. Коломия палеорусло вузьким сегментом, завглибшки до 1 км, врізається в тіло платформи в напрямку м. Городенки аж до берегів р. Дністер. З обох боків палеорусло облямоване стрімкими береговими схилами, численними відгалуженнями та врізами. Гіпсометрично найвищою є смуга уздовж північно-східного краю цієї площі, де Східноєвропейська платформа покрита гіпсоангідритовим горизонтом тиранської світи нижнього бадену. У хвильовому сейсмічному полі гіпсоангідритовий горизонт у південно-західному напрямку з наближенням до схилів ерозійної поверхні не простежується. Горизонт змінюється почерговими виходами на доміоценову поверхню відкладів крейди, юри та палеозою. Із заходу палеорусло огортається крутими схилами Слобідко-Ліснянського і Коломийського валоподібних палеовиступів, ускладнених врізами та палеопідняттями, у склепінних частинах яких збереглися відклади гіпсоангідритового горизонту. Палеовиступи характеризуються

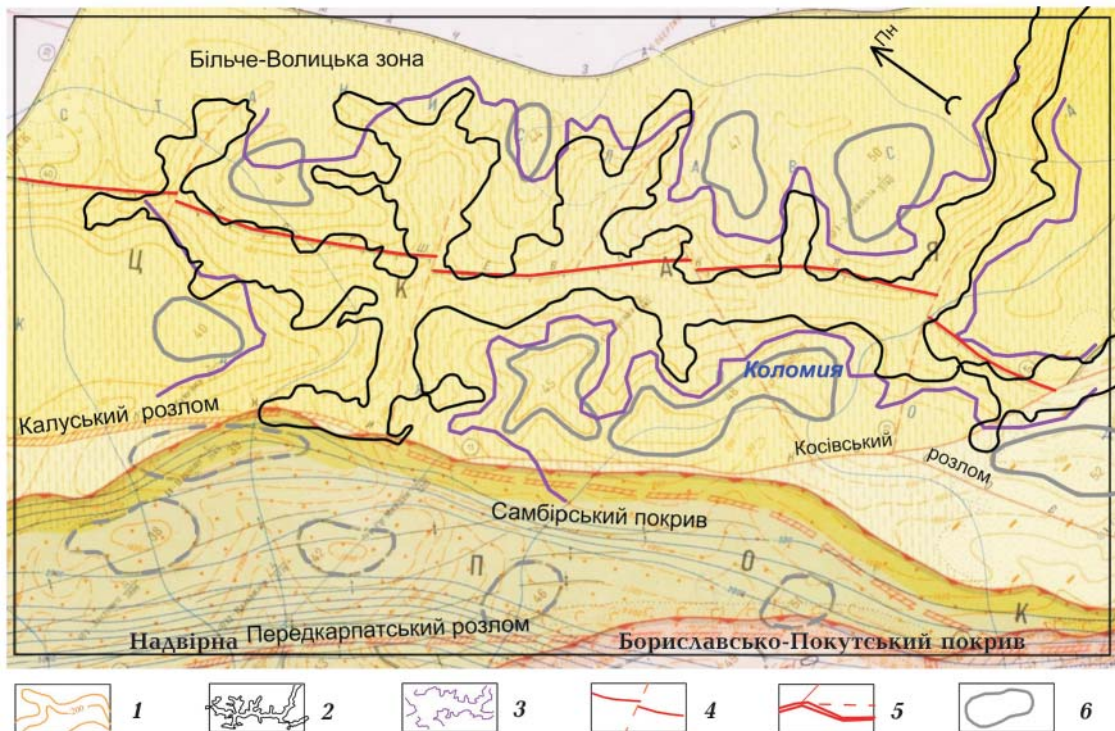


Рис. 1. Елементи тектоніки Коломиїської палеодолини: 1 — ізогіпси поверхні донеогенової основи [Тектоническая ..., 1986], 2 — контур палеодолини за гравіметричними даними, 3 — контур за даними сейсморозвідки [Заяць, 2013], 4 — коршівська флексурно-розломна зона, 5 — розломна тектоніка, 6 — великі брахіантиклінальні складки.

стрімкими північними і північно-східними схилами, сформованими Коршівським палеорозломом. Південно-західний та південно-східний схили палеовиступів пологіші.

На сьогодні основними відомими продуктивними комплексами палеовиступів і прилеглих площ Коломиїської палеодолини є теригенні відклади верхнього бадену, піскуваті шари з хорошими колекторськими властивостями. Їх особливістю є наявність лінзоподібних форм і значна мінливість як за латераллю, так і за розрізом. Ефективні товщини змінюються в межах перших десятків метрів. Пачки пісковиків слабо простежуються у склепінних частинах і більше поширені над схилами палеовиступів. Це відповідає концепції впливу морфологічних особливостей палеорельєфу доміоценової поверхні, зокрема на південному сході схилу Східноєвропейської платформи, на розміщення в геологічному розрізі неогенових структурно-літологічних пасток [Заяць та ін., 2000; Заяць, 2013].

Продуктивність на нафту і газ відкладів

мезозою на південному сході Косівсько-Угерської підзони досі не визначено. Так, здавна привертає увагу унікальна геологічна будова Середньомайданського виступу як останця мезозойських відкладів, що збережений у руслі Коломиїської палеодолини. Висота останця близько 1800—2000 м (зліва від Косівського скиду, що у районі с. Парище, рис. 2). Довивчення палеоостанця відкриває перспективи пошуку покладів вуглеводнів у автохтонній поверхні мезозою і відкладах неогену над його схилами, оскільки геологічна будова останця і родовища Лопушна подібні [Заяць, 2013].

Методика інтерпретації гравімагнітних полів. Для Західного регіону України побудовано детальні карти аномального гравітаційного та магнітного полів (масштаб 1:100 000, для окремих ділянок — 1:50 000), які у комплексі з даними сейсморозвідки та буріння можна використати для створення геолого-геофізичних моделей глибинної будови геологічного розрізу Коломиїської палеодолини та для прогнозу

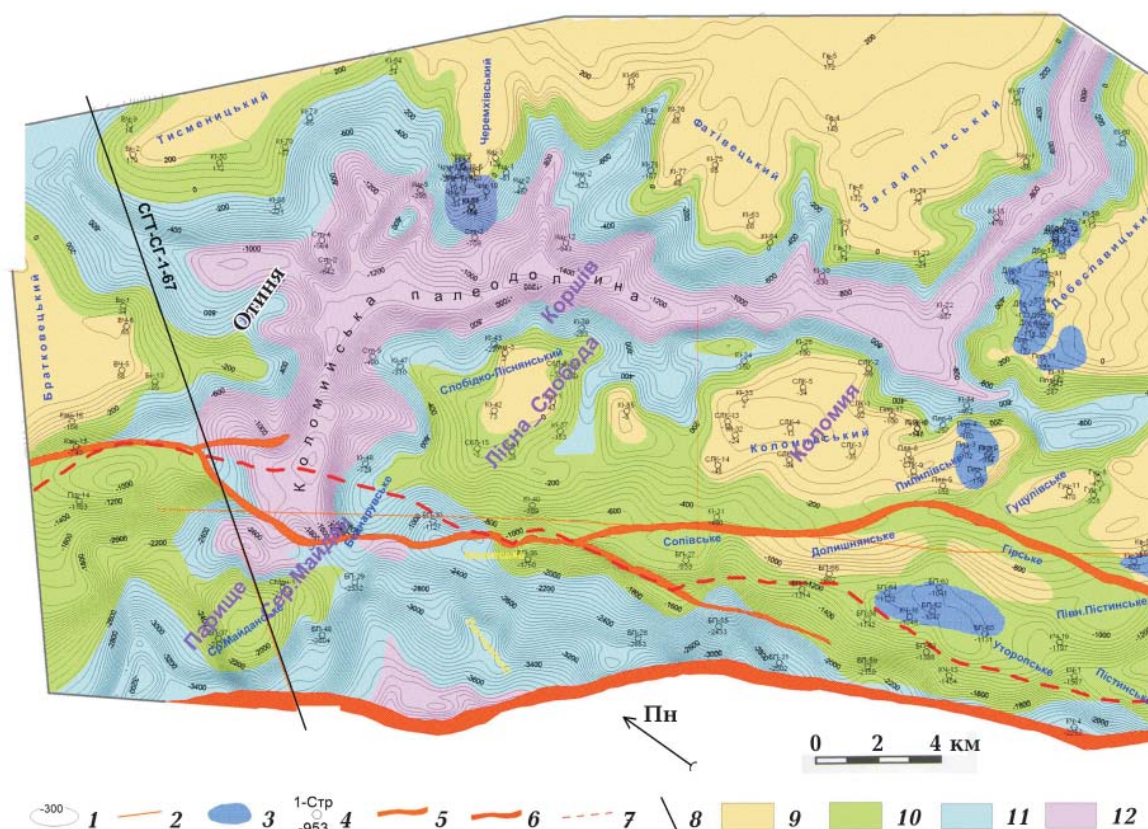


Рис. 2. Карта ерозійної доміоценової поверхні Коломийської палеодолини [Заяць, 2013]: 1 — ізогіпси доміоценової ерозійної поверхні, 2 — регіональні профілі СГТ, 3 — контури родовищ, 4 — свердловини, які розкрили ГА, Мz, Pz (над рискою — номер, під рискою — абсолютна відмітка, м), 5 — Калуський та Косівський розломи, 6 — Передкарпатський розлом, 7 — фронт Самбірського покриву, 8 — фрагмент сейсмічного профілю СГТ-СГ-1-67, 9—12 — межі простеження відкладів (9 — гіпсоангідритового горизонту, 10 — крейди, 11 — юри, 12 — палеозою).

перспективних глибинних зон. Методика інтерпретації гравімагнітних полів складається з аналізу зіставлення морфології аномальних полів, даних сейсмозвідки і структурно-тектонічних карт, зі створення, уточнення та деталізації густинних і магнітних моделей геологічних розрізів, узгоджених з даними сейсмозвідки [Анікеєв, 1999; Маєвський та ін., 2012; Мончак, Анікеєв, 2017; Анікеєв та ін., 2016, 2017, 2018 та ін.]. Інструментами інтерпретації є комп'ютерні технології трансформацій полів та розв'язання прямих і обернених задач гравімагніторозвідки.

Трансформації полів та їх якісний аналіз. Прогноз структур виконують переважно шляхом виявлення та виокремлення локальних аномалій гравітаційного і магнітного полів, які, ймовірно, зумовлені цими

структурами. Для відносного посилення або виокремлення локальних аномалій застосовують трансформації спостереженого поля. Про необхідність активного використання та подальшого розвитку теорії і практики цих лінійних перетворень потенціальних полів наголошував у своїх програмних статтях В. М. Страхов [Страхов, 1995].

Ступінь достовірності розв'язання геологічних задач залежить від можливості аналізу аномалій передбачуваної природи, у ідеальному випадку таких, що явно пов'язані з пошуковими чи розвідувальними геологічними роботами. При дослідженні нафтогазоперспективних ділянок поділ поля на аномальні складові невеликої інтенсивності, кожна з яких зумовлена переважним впливом певних структур,

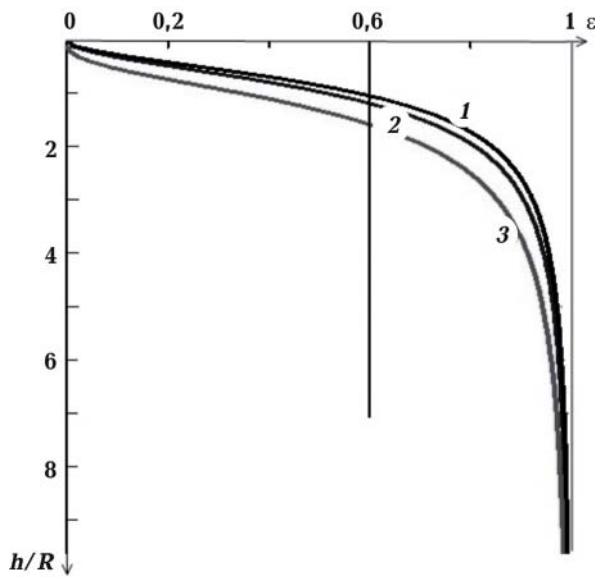


Рис. 3. Відносні глибинні характеристики трансформації осереднення поля сили тяжіння Δg (1), модуля повного вектора ΔT (2) і вертикальної складової ΔZ (3) магнітного поля: R — радіус вікна трансформації; h — глибина залягання джерел аномалій; ε — ступінь послаблення інтенсивності локальної аномалії.

що залягають у певному інтервалі глибин, є складним завданням. У методиці застосування трансформацій або їх комбінацій визначальним є вирішення геологічних завдань, яке дає змогу з формальних позицій виділити або підсилити актуальні локальні особливості поля. Саме тому слід віддавати перевагу тим трансформаціям, властивості яких відомі.

Геологічні властивості трансформацій визначаються відносними глибинними характеристиками, які надають якісний зв'язок між мірою ε послаблення (або посилення) аномалії та відносною глибиною залягання джерела h/R (R — радіус вікна трансформації), тобто дають змогу оцінювати параметри трансформацій за глибиною досліджень [Андреев, Клушин, 1962]. Ступінь геологічної достовірності глибинних характеристик залежить від співвідношення латеральної і вертикальної протяжності об'єктів (рис. 3). З глибинних характеристик випливає, що для достатнього послаблення локальних аномалій поля сили тяжіння трансформацією осереднення є умова: $h \leq R$ (на практиці це послаблення аномалій на $\geq 60\%$, тобто $\varepsilon \leq 0,6$). Для до-

статнього послаблення аномалій магнітних полів ΔT , ΔZ ця умова інша: $h \leq (1,2 \div 1,5) \cdot R$, тобто джерела магнітних аномалій, які мають ту саму протяжність, що і гравітаційні аномалії, залягають на більших глибинах.

Віднімання осередненого поля від вихідного дає шукані локальні аномалії. Розділення магнітного поля і поля сили тяжіння Українських Карпат на групи локальних аномалій виконано переважно за допомогою трансформації осереднення. Для аналізу аномальних гравімагнітних полів, представлених у вигляді розподілу ізоліній або у рельєфно-тіньовому зображенні, використано певні морфологічні ознаки прояву структур і розломів у згаданих полях. Нижче наведено важливі ознаки, перелік яких сформований за досвідом інтерпретації полів західних областей України [Анікеєв та ін., 2005а,б; Маєвський та ін., 2012 та ін.].

- Осі склепінь складок, брахіантиклінальних структур (чи синклінальних структур, палеодолин) у полі проявляються вузькими світлими (темними) смугами осей додатних (від'ємних) аномалій, а центри ізометричних додатних або від'ємних аномалій (структур) — яскравими малими за розмірами ділянками.
- Скидонасуви в осадовому комплексі можуть відображатися складними формами розгалужень смужок (зон розмежування аномалій одного знака); групи складок покриву, які виходять на поверхню, можуть чітко відображатися в аномальному полі у вигляді складного сполучення градієнтних зон і осьових ліній.
- Підняті (опущені) блоки фундаменту, групи складок (або їхні крила) зі спокійним субгоризонтальним заляганням товщ гірських порід відрізняються світлими (темними) ізометричними або неправильної форми ділянками відносно спокійного поля.
- Виступи фундаменту і глибинні розломи часто формують покривні структури, отже, можуть проявлятися у полях прямо або опосередковано через вплив на аномальне поле певного спо-

лучення приповерхневих структур, які їх облямовують.

- Протяжні поздовжні глибинні розломи і фронти насувів із значною субвертикальною амплітудою, які формують локальні структури, відображені протяжними затемненими смугами (градієнтними зонами), ланцюгом темних (світлих) видовжених ділянок-смуг; смуги поперечного спрямування відображають поперечні розломи будь-якої природи.

Нижче наведено характерні ознаки розломної тектоніки Українських Карпат у потенціальних полях рельєфно-тіньового зображення.

1. Гравітаційний регіональний мінімум і зона підвищених градієнтів з північного сходу, за якими трасується Передкарпатський розлом.

2. Протяжні на десятки кілометрів градієнтні зони, що виділяються вузькими тіньовими смугами. Поздовжні розломи карпатського простягання виразніше проявляються за північно-східного та південно-західного підсвічування. За протилежного підсвічування північно-західного та південно-східного напрямків проявляються поперечні розломи північно-східного простягання. Поздовжні розломи у межах Флішових Карпат в аномальному полі відображаються менш виразно, що зумовлено впливом покривно-складчастих структур того самого простягання і того ж або більшого порядку.

3. Затемнені або висвітлені смужки локальних аномалій. Закономірні розподіли смужок відображають ділянки певної тектонічної будови або зони тектонічних порушень, зокрема поперечних розломів з простяганням на декілька кілометрів.

4. Світлі ділянки відповідають піднятим блокам фундаменту, а затемнені – опущеним; темні лінії – ймовірно розломи (у тому числі високоамплітудні).

5. Досить різкі, переважно лінійно-витягнутої форми межі зміни морфології аномального поля.

Гравімагнітне моделювання геологічного розриву. Геолого-гравітаційне і геомагнітне

моделювання використовують для побудови густинних та магнітних моделей геологічного середовища за спостереженими полями з урахуванням даних буріння, сейсморозвідки та інших геолого-геофізичних матеріалів. Моделювання дає змогу оцінювати ступінь достовірності апріорі побудованих моделей, уточнювати та деталізувати їх елементи. Умовою достовірності моделювання є максимальне використання геолого-геофізичних матеріалів у апріорних (первинних) моделях геологічного розриву, у тому числі сейсмогеологічні побудови, та підпорядкованість результату моделювання змістовним геологічним гіпотезам щодо будови геологічного середовища.

Моделювання виконують з використанням комп'ютерних програм розв'язання прямих і обернених лінійних або структурних задач гравіроздавки «Complex Gravity», магніторозвідки «Complex Magnet» і методики неформальної (геологічно змістовної) послідовності еквівалентних розв'язків оберненої задачі [Анікеєв 1999, 2008] з урахуванням заданої похибки побудови моделей геологічного середовища, яка є відхиленням (середньоквадратичним або максимальним) поля моделі від спостереженого поля. Зазначені комп'ютерні системи та методика їх використання є певним кроком розвитку теорії і технологій автоматизованої системи інтерпретації гравіметричних матеріалів (АСІГМ) «Карпати», яка у 1985—1989 р. пройшла експертизу та була прийнята у фонди алгоритмів і програм при ЦГЕ МНП СРСР [Кобрунов, 1985; Кобрунов та ін., 1987; Степанюк та ін., 1989].

Отриманню позитивного результату у моделюванні сприяє використання оптимальної апроксимаційної конструкції складних моделей геологічних середовищ та швидкісних і точних способів обчислень, що дає змогу працювати з великими обсягами даних [Анікеєв, 1997, 2010, 2011]. Крім того, моделювання — це інтерактивний процес, заснований на геологічному аналізі розбіжностей між спостереженим полем і полем моделі. Методику кількісної інтерпретації гравіметричних і магнітоме-

тричних матеріалів, у разі якщо комп'ютерні технології моделювання для складнобудованих середовищ важливі, але є лише інструментом геологічної інтерпретації, слід називати методикою геолого-гравітаційного (геолого-магнітного) моделювання.

На початковому етапі моделювання (етап уточнення) аналізують характер розбіжності між спостереженим полем і полем апіорної моделі та у передбачених межах коригують параметри моделі у такий спосіб, за якого має зменшитися розбіжність між спостереженим полем і полем моделі. Далі у інтерактивному режимі (розв'язання прямої задачі, аналіз полів, уточнення моделі) досягають задовільної узгодженості модельного та спостереженого полів. Інакше кажучи, застосовують *метод простого підбору* (визначення Є.Г. Булаха), який є доволі практичним способом розв'язання обернених задач гравіметрії (ОЗГ) і магнітометрії (ОЗМ). Наступний етап моделювання — деталізація моделі за розподілом густин (намагніченості) або за геометрією геогустинних (геомагнітних) меж. При цьому застосовують комп'ютерні технології розв'язання обернених задач.

Апіорним даним властиві неповнота та неоднозначність, тому на їх підґрунті можна сформулювати низку гіпотез щодо будови геологічного середовища. Апіорні дані та гіпотези формалізують у вигляді апіорних моделей середовища (АМС) і певних обмежень (проекторів). АМС і проектори є основним змістом критеріїв, що забезпечують розв'язання ОЗГ/ОЗМ з наперед заданими властивостями. Отже, результатом розв'язання ОЗГ/ОЗМ є одна з еквівалентних моделей середовища (ЕМС). Фактично ЕМС — це модельна реалізація формалізованої гіпотези.

Інтерпретація множини ЕМС спрямована на підвищення ймовірності та детальності її елементів. Число гіпотез зменшується за рахунок тих з них, реалізації яких геологічно беззмістовні або суперечливі по суті. Підвищення ймовірності досягається виявленням особливостей, що зберігають-

ся або проявляються у більшості ЕМС. Кінцевою метою інтерпретації множини ЕМС є вибір оптимальної моделі (ОМС), тобто найзмістовнішої та достовірнішої, або малого числа однаково ймовірних ЕМС.

Кроки методики неформальної послідовності еквівалентних рішень:

- 1) формулювання геологічних гіпотез (ГГ);
- 2) формалізація геологічних гіпотез (ГГ→АМС);
- 3) реалізація гіпотез (АМС→ЕМС);
- 4) інтерпретація множини ЕМС (ЕМС→→ОМС).

У комп'ютерних технологіях реалізовано алгоритми швидкої згортки розв'язків прямих і обернених задач та апроксимаційні конструкції великої розмірності [Анікеєв, 1999, 2010, 2011], а також ідеї критеріального підходу до розв'язання геофізичних обернених задач [Кобрунов, 1985].

Морфологія гравітаційного і магнітного полів. Просторове зображення рельєфу доміючої поверхні Коломиїської палеодолини показано на рис. 4. Рельєф цієї поверхні є результатом ерозійних процесів, започаткованих розломами, та сприймається як рельєф гідрологічної мережі південно-західного узбережжя платформи.

Морфологія аномального поля сили тяжіння в редукції Буге (рис. 5, а) корелює із сейсмічними побудовами ерозійної поверхні палеодолини. Просторову морфологію доповнює зображення поля в ізоаномалах у комбінації з рельєфно-тіньовим фоном (рис. 6). Аномалії модуля повного вектора магнітного поля (надалі — магнітне поле) практично не корелюють з рельєфом палеодолини (див. рис. 5, б, 7), контур якої представлено за морфологією локальних аномалій поля сили тяжіння (рис. 8) з урахуванням сейсмічних побудов (див. рис. 2).

Відсутність кореляції зумовлена відносно слабкими магнітними властивостями осадових порід. Загальний тренд поля спричинений схилом платформи, а великі магнітні аномалії — піднятими блоками фундаменту, які, ймовірно, вплинули на розвиток розгалужень палеодолини.

Палеодолина та сегменти врізів чітко відображені у локальних аномаліях поля сили тяжіння (див. рис. 8), які отримано за допомогою трансформації осереднення з радіусом вікна 2500 м. Додатні локальні аномалії в облямуванні палеодолини (відображені жовтим кольором) зумовлені впливом більш ущільнених порід палеовиступів (або брахіантикліналей). Усі значні родовища газу зіставлені з епіцентрами або периферією додатних аномалій. Однак не всі великі брахіантиклінали корелюють з додатними аномаліями, тому можна піддати сумніву достовірність їх визначення.

За морфологією магнітних локальних аномалій (рис. 9) (які також отримано за допомогою трансформації осереднення з радіусом вікна 2500 м) Коломийська палеодолина розміщується у перехідній зоні від великих інтенсивних аномалій складної форми (осі — північно-східного або північно-західного простягання) до менших за розмірами та інтенсивністю аномалій різних форми та простягання. Основна вісь палеоруслу якби прагне проходити вздовж від'ємних магнітних аномалій; північні розгалуження палеодолини тяжіють до додатних аномалій.

Центральна частина палеоруслу Коломийської палеодолини з південного заходу обмежена найбільшими Слобідколісниським і Коломийським палеовиступами (див. рис. 2, 10), які розглядають, як одну перспективну ділянку. Морфологія локального аномального поля сили тяжіння цієї ділянки (рис. 11) відображає геометрію палеовиступів.

Однак за аномаліями поля сили тяжіння південний край Коломийського та північний край Слобідколісниського палеовиступів мають бути на рівні нульової ізогіпси або й вище, а не -100 і глибше, як на структурній карті (див. рис. 10), тобто бути найвищими у межах палеовиступів, а отже, і менш перспективними їхніми частинами. Також за умов однорідності основних осадових товщ височини палеовиступів є меншими за розмірами та складнішою форми.

Для успішнішого планування пошукового буріння у межах схилів цих палеовисо-

чин крім сейсмогеологічних даних потрібно враховувати й гравіметричні матеріали.

Геолого-гравітаційне та геолого-магнітне моделювання Коломийської палеодолини за геотраверсом СГ-І°(67). Уздовж геотраверсу СГ-І°(67) (див. рис. 2) глибинну сейсмічну модель (рис. 12) відтворено за даними КМЗХ (ДП «Спецгеофізика», 1967 р.) та близько розташованих профілів КМЗХ РП-III і РП-XXI і часових розрізів МСГТ (сейсморозвідувальні роботи Західноукраїнської геолого-розвідувальної експедиції (ЗУГРЕ)). Так, поверхню протофундаменту K_2 простежено за матеріалами КМЗХ (за профілем РП-XXI) та за чіткими відбиттями на часових розрізах МСГТ. Поверхня K_2 заглиблюється від 4 км на території Східноєвропейської платформи до 16 км під Самбірським покривом. За зміною динамічних особливостей хвильової картини (дані МСГТ) у межах похованої тектонічної зони (ПТЗ) прогнозовано глибинні інтрузії, які можуть сягати підосви осадового покриву. Глибинні розломи, виділені за даними сейсморозвідки, поділяють земну кору на блоки і проникають в осадовий покрив.

Важливим кроком моделювання є оцінювання достовірності апріорних сейсмогеологічних побудов. Питання щодо ступеня достовірності можна сформулювати так: «Якою мірою апріорні модельні поля узгоджуються зі спостереженими гравімагнітними полями за формальною інтегральною ознакою (середньоквадратичним відхиленням) та за візуальним аналізом характеру неузгодженості уздовж профілю?». До дискусійних питань щодо глибинних побудов за геотраверсом СГ-І°(67) належать положення розломів фундаменту, наявність інтрузій у похованій тектонічній зоні фундаменту, складність геометрії меж K_1 , K_2 , поверхні палеозою і палеоостанців мезозойських відкладів, імовірність ділянок суттєвого ущільнення або розущільнення в осадовому чохла та у приповерхневих зонах фундаменту. Також очевидно, що методика моделювання має забезпечувати як можна менші зміни у геометрії апріорної сейсмогеологічної

моделі, але за умов урахування ймовірних меж значень густини та намагніченості виокремлених товщ і блоків.

Апроксимаційна конструкція моделювання, достатня для вирішення геологічних завдань, така: довжина профілю — 80 км; крок дискретизації полів і моделі за профілем — 100 м; дискретизація моделі за глибиною — від 50 (верхня частина розрізу) до 100 м (глибинна); максимальна глибина моделювання — 20 км.

Апріорні геогустинна і геомагнітна моделі відтворюють структурну частину сейсмологічної моделі СГ-І (67). Кожну межу визначено на всю довжину геотраверсу або до розлому, або до місця виклинювання. У південно-західній частині геотраверсу задля зменшення впливу зон, бокових до ділянки моделювання, що впливають на гравітаційний мінімум та його градієнти у північно-східному напрямку, модель доповнено побудовами з близько розташованих профілів геолого-гравітаційного моделювання [Маєвський та ін., 2012]. Густи-ну (намагніченість) кожної тов-

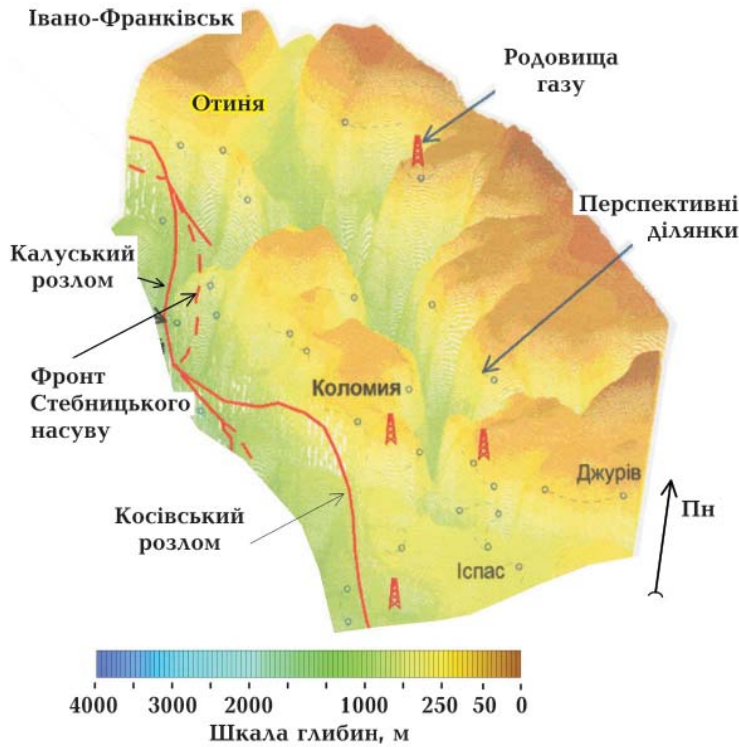


Рис. 4. Просторове зображення ерозійної доміоценової поверхні Коломиїської палеодолини (побудовано за сейсмічними матеріалами) [Заяць, 2013].



Рис. 5. Аномальне поле сили тяжіння в редукції Буге (а) та аномалії модуля повного вектора магнітного поля (б) Коломиїської палеодолини (за матеріалами ПДРГП «Північукргеологія») у 3D зображенні.

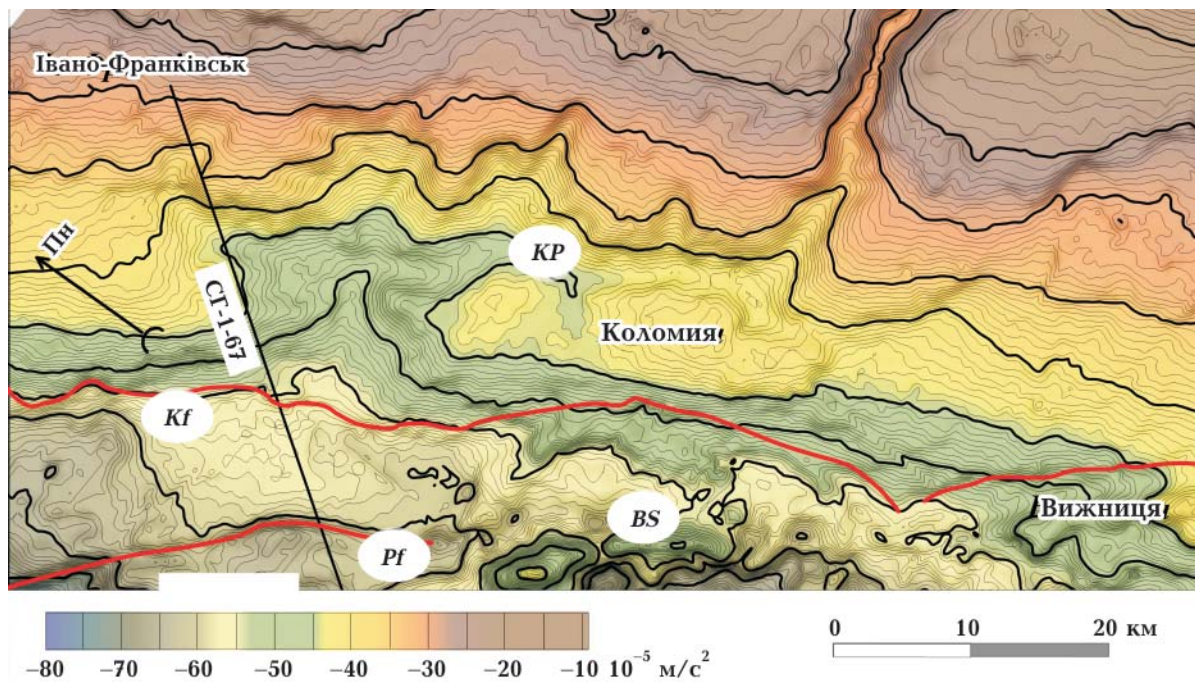


Рис. 6. Поле сили тяжіння в редуції Буге з елементами тектоніки Коломийської палеодолини. Структурно-тектонічні елементи: *KP* — Коломийська палеодолина; *BS* — Березівська кільцева структура [Зяць, Анікеев, 2007]; *Kf* — Калуський розлом; *Pf* — зона Передкарпатського розлому.

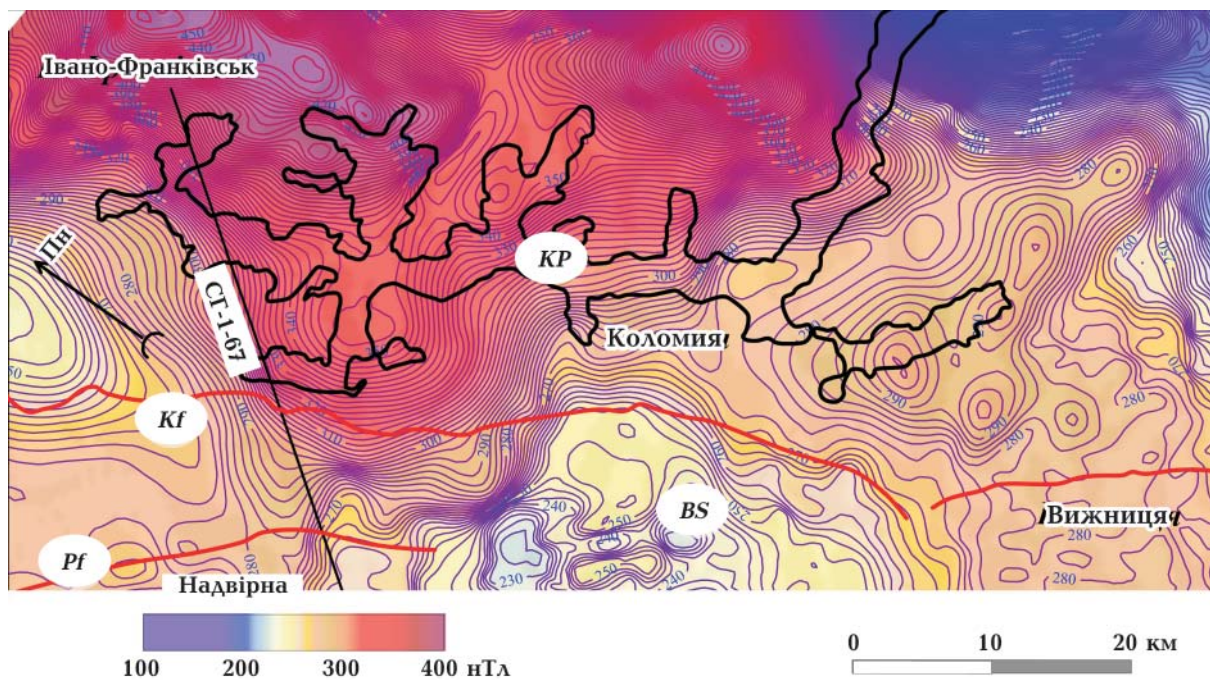


Рис. 7. Магнітне поле з елементами тектоніки Коломийської палеодолини. Позначення структурно-тектонічних елементів див. на рис. 6.

щі або блока апріорної моделі визначено за даними згаданих вище моделювань та за матеріалами публікацій [Максимчук та ін., 2006 та ін.].

Уточнену та деталізовану геогустинну модель показано на рис. 13. Формальною оцінкою точності моделювання є середньоквадратична розбіжність між спостере-

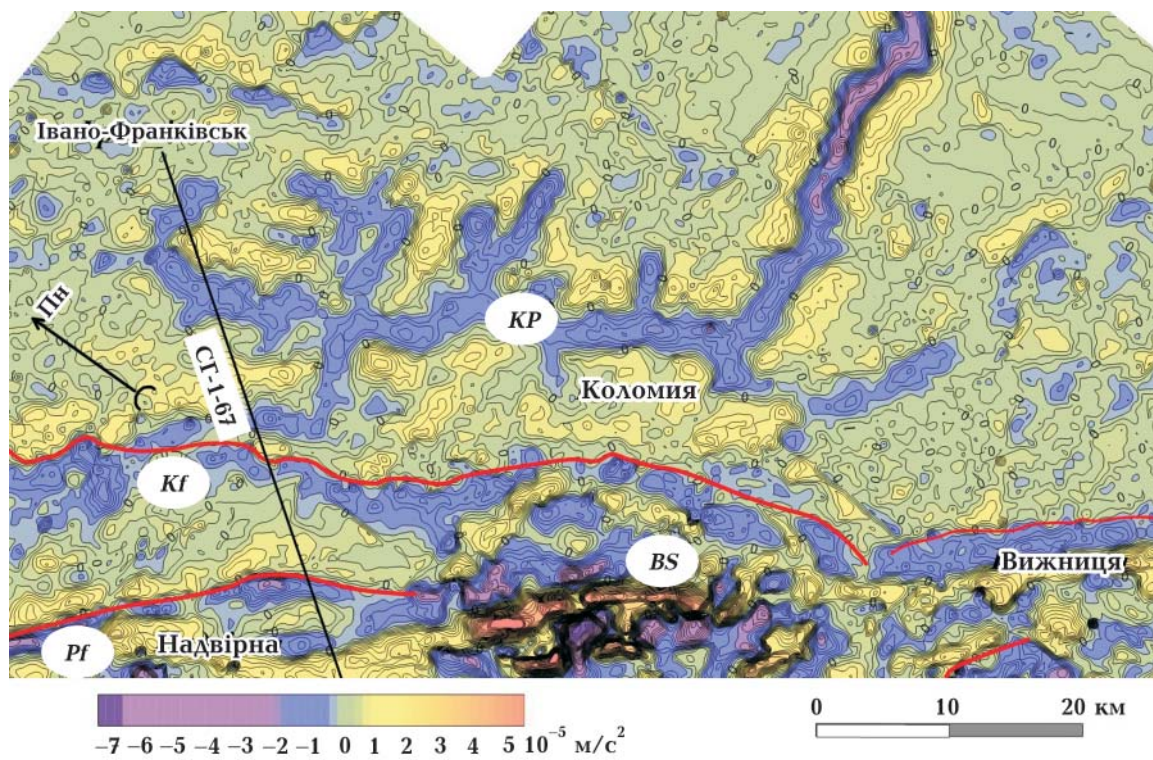


Рис. 8. Локальні аномалії поля сили тяжіння Коломиїської палеодолини (в ізоаномалах). Позначення структурно-тектонічних елементів див. на рис. 6.

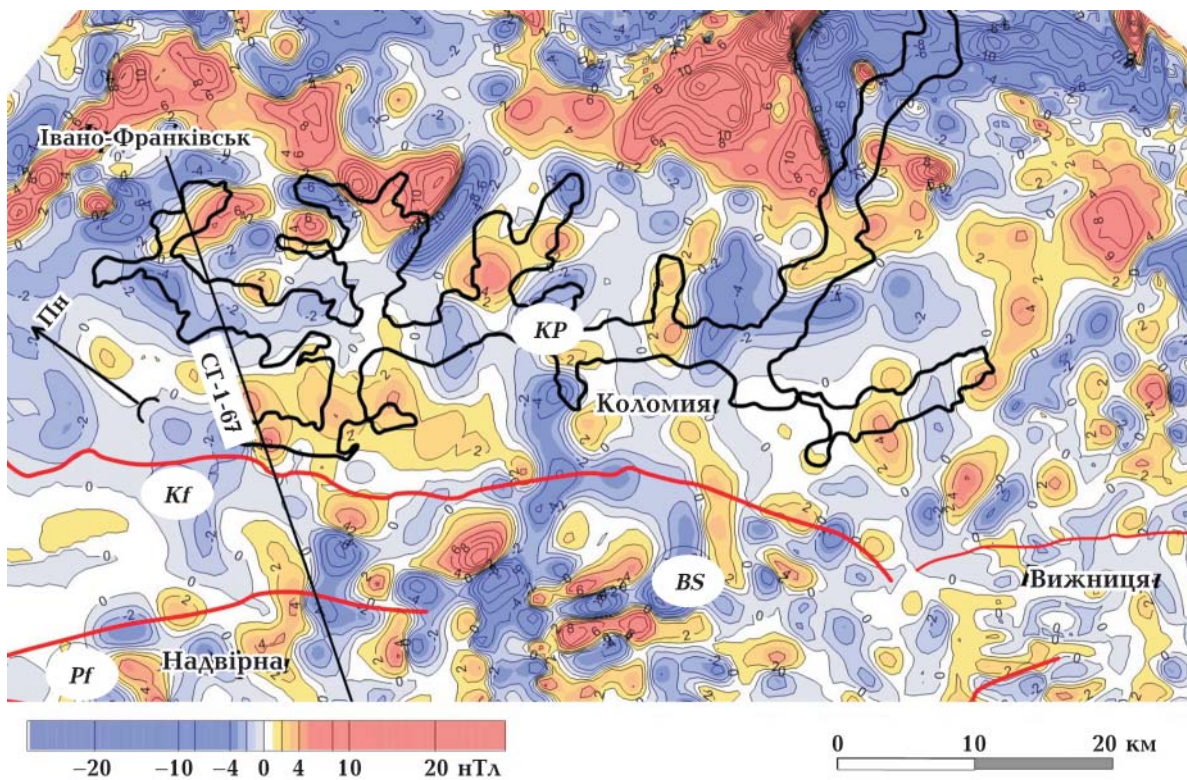


Рис. 9. Локальні аномалії магнітного поля Коломиїської палеодолини (в ізодинамах). Позначення структурно-тектонічних елементів див. на рис. 6.

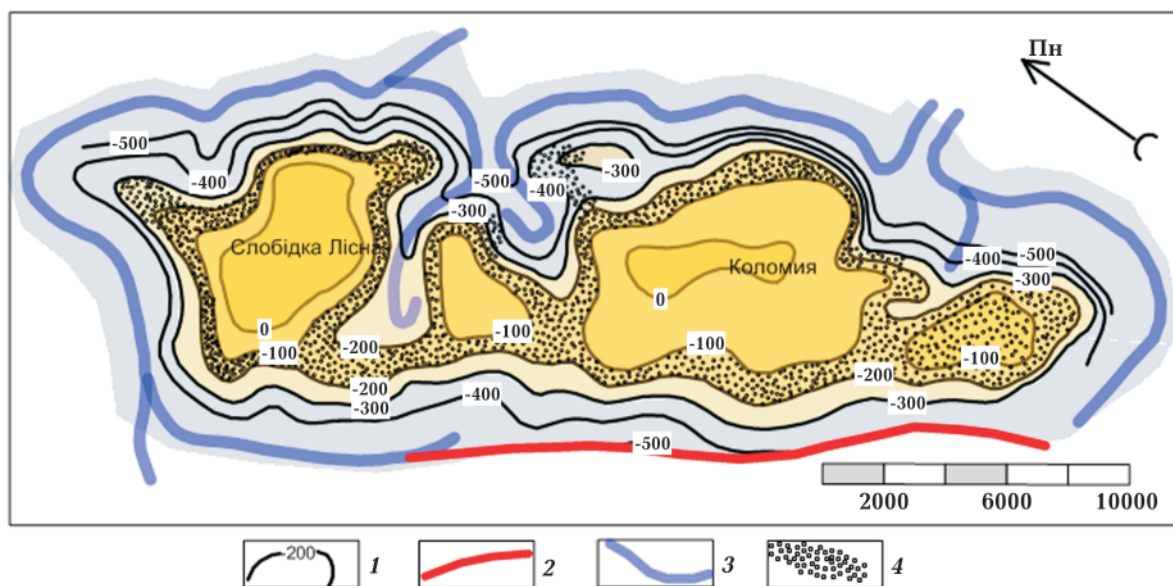


Рис. 10. Структурна карта доміоценової поверхні Слобідколіснянського та Коломийського палеовиступів [Зяць, 2013]: 1 — ізогіпси за сейсмічними даними (ЛВ УкрДГРІ, 2003), 2 — лінія Косівського розлому, 3 — напрямки водних потоків прарічок, 4 — перспективні ділянки в баденських відкладах, розташовані переважно у смузі ізогіпс від -100 до -200 м.

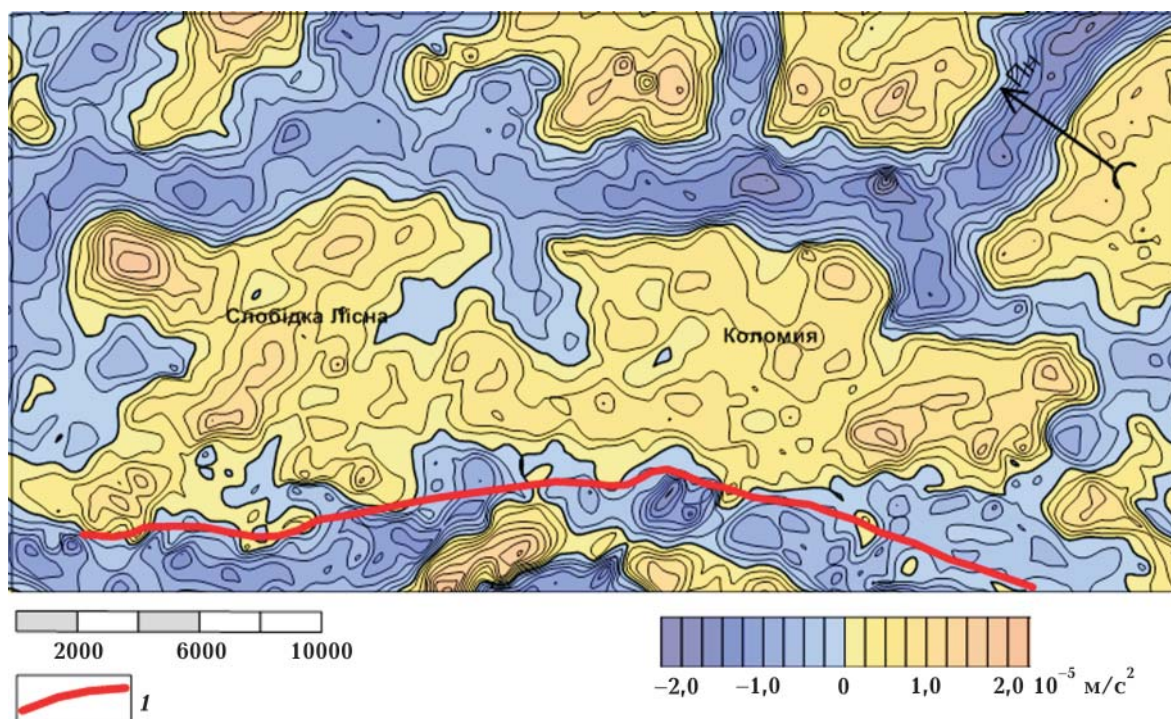


Рис. 11. Локальні аномалії поля сили тяжіння площі Слобідка Лісна—Коломия: 1 — лінія Косівського розлому за гравіметричними даними.

женим полем і полем моделі, яку зменшено з $5,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,4 \cdot 10^{-5}$ м/с^2 (крок моделювання — уточнення геометрії та густин моделі), а за кроком деталізації — до $0,11 \cdot 10^{-5}$ м/с^2 . Тому у масштабі рис. 13 обидві криві поля

сили тяжіння (спостережене і модельне) майже збігаються.

Уточнена модель (за методом простого підбору) відрізняється від апріорної моделі змінами у блоковій будові фундаменту та

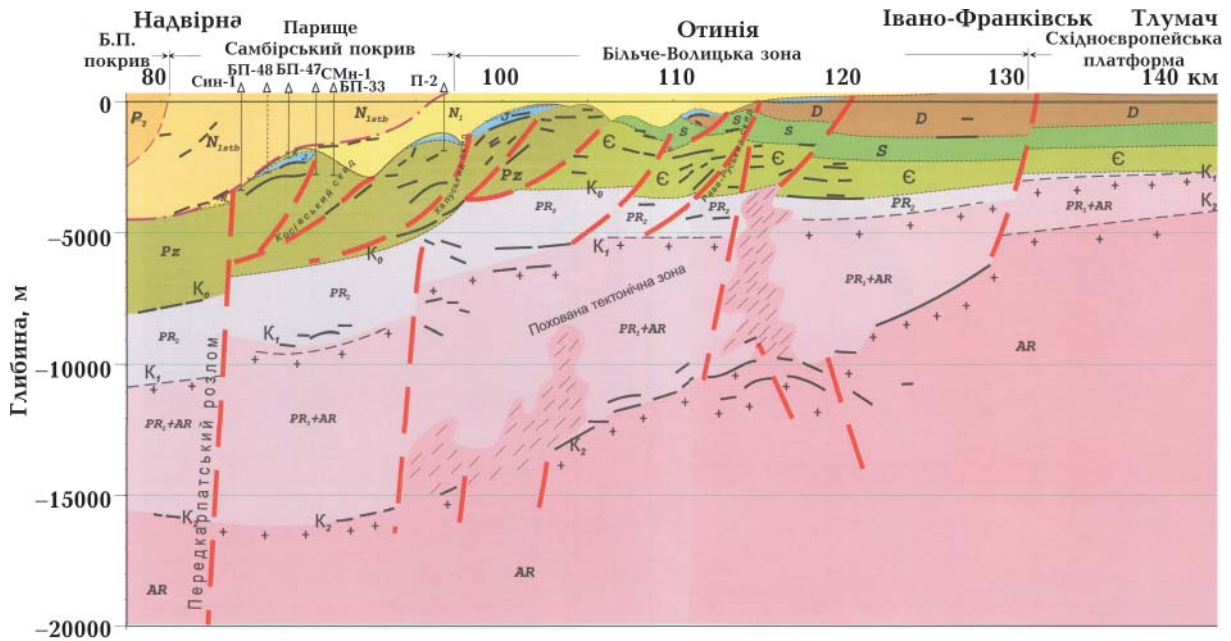


Рис. 12. Априорна сейсмологічна модель за геотраверсом Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ [Заяць, 2013].

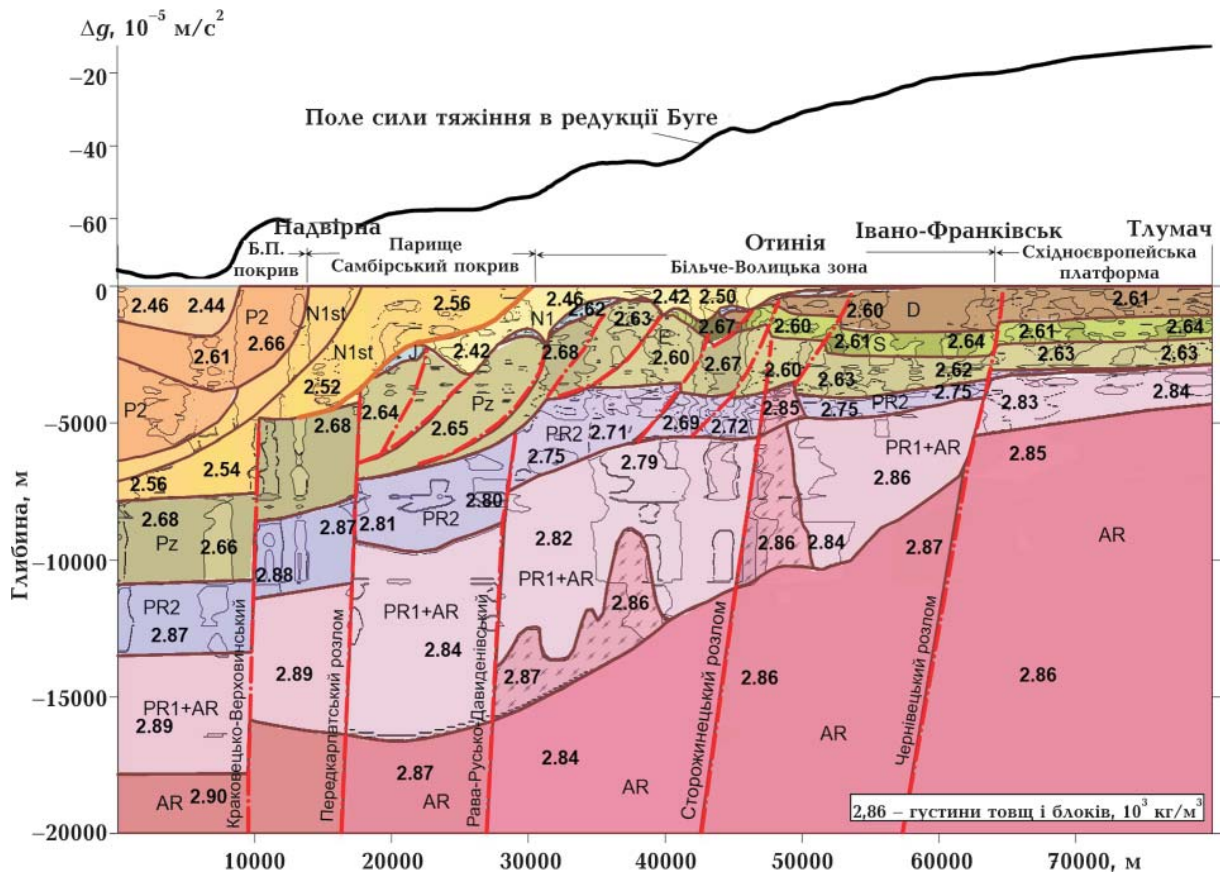


Рис. 13. Густинна модель за геотраверсом Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ.

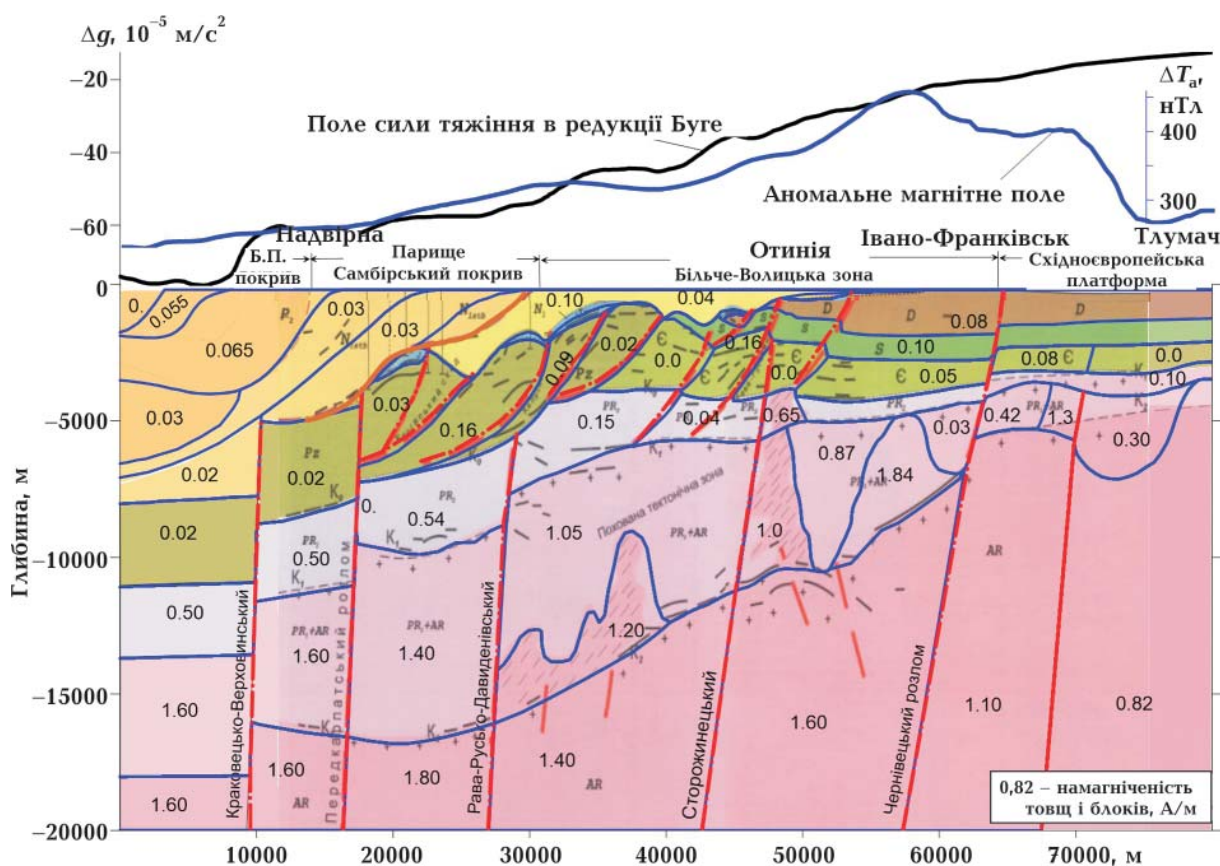


Рис. 14. Магнітна модель за геотраверсом Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ.

геометрією осадових товщ, що прилягають до бокових зон. Також уточнено значення густини за розрізом. У деталізованій моделі (за методом деталізації) виокремлено зони ущільнення і розущільнення по товщах осадового чохла, протерозою та архею до поверхні протофундаменту.

Геолого-гравітаційне моделювання за геотраверсом СГ-І^о(67) виконано з високою формальною точністю та майже без змін у геометрії апріорної сейсмогеологічної моделі. Модель деталізовано в основному за рахунок розподілу густин у межах товщ осадового чохла та блоків фундаменту.

Зауважимо, що інтенсивність поля сили тяжіння за профілем у північно-східному напрямку зростає від $-75 \cdot 10^{-5}$ (Бориславо-Покутський покрив) до $-15 \cdot 10^{-5}$ м/с² за м. Тлумач. Натомість у цьому напрямку густини порід по товщах (блоках) від палеозою до архею, навпаки, зменшуються на $(0,02-0,06) \cdot 10^3$ кг/м³. Пояснюється це переважним впливом на поле наближення

до земної поверхні гравіактивних меж мезозою—палеозою та архею—протерозою.

Густини архейських та архей-протерозойських комплексів слабо диференційовані. Меншими значеннями густини характеризується центральний Отинійський блок (AR— $2,84 \cdot 10^3$ кг/м³, PR₁+AR— $(2,79-2,82) \cdot 10^3$ кг/м³, PR₂— $(2,69-2,75) \cdot 10^3$ кг/м³); більшими — Надвірнянський блок (AR— $(2,90 \cdot 10^3$ кг/м³, PR₁+AR— $2,89 \cdot 10^3$ кг/м³, PR₂— $(2,87-2,89) \cdot 10^3$ кг/м³). У центральних частинах Отинійського та Івано-Франківського блоків густини зменшено на $-0,02 \cdot 10^3$ кг/м³ і, навпаки, у південно-західних природозломних окраїнах цих блоків густини підвищено на $+0,04 \cdot 10^3$ кг/м³, тобто інтрузії у ПТЗ імовірні, але їхню геометрію визначити складно. Понижені значення густини порід верхнього протерозою і вище за розрізом в Отинійському блоці пояснюємо «густинною компенсацією» наближення його до земної поверхні.

Результати моделювання підтверджу-

ють наявність палеоостанців мезозойських відкладів на піднятих Парище-Отинійських блоках. У межах товщ палеозою (Отинійський блок) виявлено зони розущільнення (до $2,60 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), які розміщуються за Калуським скидом та безпосередньо прилягають до північно-східного схилу структури антиклінальної форми і які у заглибленні розділені інтенсивними ущільненнями кембрійських відкладів (до $2,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) біля Калуського та Рава-Руського скидів.

Назагал осадова товща характеризується значною диференціацією густини гірських порід від $2,42 \cdot 10^3 (N_1)$ до $2,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 (PZ)$. У центральній частині профілю сітка розломів, поширених у товщах мезозою—палеозою, зумовлює складну морфологію поля сили тяжіння та, очевидно, й підвищену диференціацію густин мезозой-палеозойських відкладів. У північно-східній частині профілю така диференціація густин є лише у товщах силуру ($2,60 \div 2,64) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Геомагнітну модель (рис. 14) побудовано з урахуванням результатів геолого-гравітаційного моделювання зі збереженням геометрії товщ і блоків сейсмогравітаційної моделі. Втім до північно-східної ділянки гетраверсу, де уведено розломи, що розмежовують товщі у кембрії та блоки у протерозої з різною намагніченістю, а також до ПТЗ уведено додаткову зону ймовірної інтрузії та глибинний розлом і ускладнено геометрію поверхні фундаменту. Максимальна розбіжність між спостереженим магнітним полем і полем моделі, яка досягнута у результаті моделювання, не перевищує 5 нТл. У масштабі рис. 14 обидві криві магнітного поля (спостереженого і модельного) збігаються.

Геолого-магнітне моделювання ускладнено таким:

- введенням аномалій модуля повного вектора магнітного поля (ΔT)_a;
- суттєвою диференціацією гірських порід фундаменту за їхніми магнітними властивостями;
- високою чутливістю аномального магнітного поля до геометрії товщ та власти-

востей гірських порід верхньої частини геологічного розрізу;

– на початку поступовим підбором значень (у апіорі визначених межах) намагніченості гірських порід та уточненням блокової будови фундаменту з більших глибин до поверхні фундаменту.

Приповерхневі породи осадового чохла доцільно зберігати однорідними з апіорними мінімальними значеннями намагніченості.

У магнітній моделі товщі осадового покриву слабوماгнітні; архей-протерозойські блоки контрастніші за намагніченістю, ніж за густиною у густинній моделі. Наближення цих блоків до земної поверхні у північно-східному напрямку (від Складчастих Карпат до Східноєвропейської платформи) зумовлює суттєве зростання інтенсивності магнітного поля. Для узгодження модельного магнітного поля зі спостереженим у цьому напрямку намагніченість блоків було понижено від 1,60 до 0,30 А/м. Геомагнітною моделлю підтверджено наявність інтрузій (їхня намагніченість відносно порід PR_1+AR підвищена на +0,20 А/м), які прогнозовано за даними сейсморозвідки та густинною моделлю. У межах ПТЗ в Івано-Франківському блоці біля Чернівецького розлому припускаємо наявність інтрузивного тіла, намагніченого до 1,84 А/м. Унаслідок різкого пониження рівня магнітного поля на північно-східному кінці геотраверсу в модель уведено глибинний розлом та ускладнено геометрію поверхні протофундаменту (рис. 14).

Висновки. Побудовано комплексну сейсмогравімагнітну модель геологічного розрізу у перетині північно-західної частини Коломиїської палеодолини вздовж геотраверсу СГ-1 (67). Палеодолина та окремі її структурні елементи дуже добре відображуються у морфології гравітаційного поля; блокова будова фундаменту та глибинні інтрузії — у магнітному полі. В процесі гравімагнітного моделювання підтверджено достовірність геометрії сейсмогеологічної моделі, визначено розподіл густини і намагніченості у межах передбачуваної точності первинних структурних

побудов та ймовірних інтервалів можливих значень густини й намагніченості геологічних товщ і блоків фундаменту. В осадовому чохла виявлено зони значного розушільнення та ущільнення. Зони розушільнення, які прилягають до палеоостанців мезозойських відкладів, прогнозуємо як перспективні.

Комплексний аналіз гравітаційного та магнітного полів уздовж сейсмогеологічного профілю СГ-I(67) Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ дав змогу уточнити сейсмогеологічну модель геологічного розрізу Коломийської палеодолини:

- деталізовано розподіл густини та намагніченості гірських порід осадового чохла та блоків фундаменту до глибини 20 км;
- у межах окремих стратиграфічних

комплексів осадового чохла виявлено зони розушільнення, які слід розглядати як перспективні щодо нафтогазопошукових робіт;

– підтверджено результати сейсморозвідки про наявність інтрузивних тіл у блоках фундаменту Більче-Волицької зони.

Отримані результати підтверджують високу інформативність комплексної інтерпретації гравітаційного та аномального магнітного полів у вивченні геологічної будови Передкарпатського прогину, а також доцільність застосування гравімагнітного моделювання при вирішенні завдань оцінювання перспектив нафтогазоносності окремих осадових комплексів, зокрема палеозойських відкладів Коломийської палеодолини.

Список літератури

- Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Ленинград: Гостоптехиздат, 1962. 495 с.
- Анікеєв С. Г. Комп'ютерна система рішення прямих та обернених задач гравірозувідки для 2D/3D моделей складно побудованих середовищ. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 1997. № 34. С. 57—63.
- Анікеєв С. Г. Методика інтерпретації гравіметричних матеріалів при произвольном строении геологических сред; Дис. ... канд. геол. наук. Киев: Институт геофизики им. С. И. Субботина НАНУ, 1999. 242 с.
- Анікеєв С. Г. Про методику моделювання складнобудованих середовищ у гравірозувідці. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. Київ: ТОВ Карбон ЛТД, 2008. № 5. С. 67—72.
- Анікеєв С. Г. Про спосіб швидкого рішення прямої задачі гравірозувідки і магніторозвідки з використанням кінцево-елементних апроксимацій. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. Київ: ТОВ Карбон ЛТД, 2010. № 7. С. 43—51.
- Анікеєв С. Г. Рішення прямих задач гравімагніторозвідки для складних моделей середовища за допомогою швидкої згортки. *Геодинаміка*. 2011. № 2(11). С. 18—20.
- Анікеєв С. Г., Бабюк С. Г., Степанюк В. П. Гравітаційне моделювання на Східно-Долинській площі. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. Київ: ТОВ Карбон ЛТД, 2005а. № 2. С. 75—84.
- Анікеєв С. Г., Бабюк С. Г., Степанюк В. П. Елементи розломної тектоніки Українських Карпат за гравітаційними матеріалами. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. Київ: ТОВ Карбон ЛТД, 2005б. № 2. С. 85—93.
- Анікеєв С., Максимчук В., Мельник М. Геолого-гравітаційне моделювання по сейсмогеотраверсу СГ-I (67) Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ: *Матеріали VI Міжнар. наук. конф. «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища»*, Львів, 20—23 вересня 2016 р. Львів: СПОЛОМ, 2016. С. 26—28.
- Анікеєв С. Г., Максимчук В. Ю., Мельник М. М. Густинна модель Коломийської палеодолини за геотраверсом СГ-I (67) Надвірна—Отинія—Івано-Франківськ. *Геодинаміка*. 2017. № 1(22). С. 74—84.
- Анікеєв С. Г., Максимчук В. Ю., Пилип'як М. М. Гравімагнітне моделювання при вивченні геологічної будови Коломийської палеодолини: *Матеріали міжнар. наук.-техн. конф.*

- «Нафтогазова галузь: перспективи нарощування ресурсної бази», Івано-Франківськ, 23—25 травня 2018 р. Івано-Франківськ: Вид. ІФНТУНГ, 2018. С. 150—153.
- Булах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Математические методы геологической интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных. Киев: Наук. думка, 2010. 463 с.
- Гінтов О. Б., Орлюк М. І., Єнтін В. А., Пашкевич І. К., Мичак С. В., Бакаржієва М. І., Шимків А. М., Марченко А. В. Структура західної і центральної частин Українського щита. Спирні питання. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 3—29. doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000.
- Заяць Х. Б. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту та газ. Львів: Вид. ЛВ УкрДГРІ, 2013. 136 с.
- Заяць Х. Б., Анікеєв С. Г. Ознаки можливого збагачення корисними копалинами надр феномену Коломиїської палеодолини: *Труди IV Міжнарод. научн.-практ. конф. «Комплексное изучение и освоение природных и техногенных россыпей»*, Симферополь, 17—22 сентября 2007 г. Симферополь: ПолиПресс, 2007. С. 40—41.
- Заяць Х. Б., Королюк П. О., Беловолова Л. П. Пошуки нових пасток газу в бадені за змінами ерозійних форм палеорельєфу основи Більче-Волицької зони. *Мінеральні ресурси України.* 2005. № 5. С. 23—26.
- Заяць Х. Б., Морошан Р. П., Довгий І. І. Особливості давнього ерозійного рельєфу мезопалеозойської основи Передкарпатського прогину за сейсмічними даними. *Геологія і геохімія горючих копалин.* 2000. № 1. С. 60—64.
- Кобрунов А. И. Теоретические основы критерияльного подхода к анализу геофизических данных (на примере задач гравиметрии). ИФИНГ. Ивано-Франковск. 1985. 269 с. Деп. в УкрНИИИТИ 18.02.86 Т 1280-УК86.
- Кобрунов А. И., Анікеєв С. Г., Благий И. И. Комплекс программ решения обратной задачи гравиразведки в классе распределения плотности в площадном варианте «Масса-3» АСИГМ «Карпаты». Москва: ГОСФАП СССР. № 50870000812, 1987.
- Кобрунов А. И., Петровский А. П. Кобрунов С. А. Эволюционно-динамические принципы при реконструкции структурных плотностных моделей седиментационных бассейнов. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 3. С. 375—380.
- 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 глибокозанурених горизонтів Українських Карпат. Івано-Франківськ: Вид. ІФНТУНГ, 2012. 208 с.
- Максимчук В. Ю. Кудеравець Р. С., Просим'як В. М., Степанюк В. П., Мончак Л. С., Бугера В. В. Магнітні властивості гірських порід південно-східної частини Передкарпатського прогину. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2006. № 3(20). С. 41—49.
- 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>.
- Старостенко В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978. 226 с.
- Степанюк В. П., Анікеєв С. Г., Бабюк С. Г. Методика применения АСИГМ «Карпаты». Москва: ГОСФАП СССР. № 50870001415, 1989.
- 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. Ред. В. В. Глушко, С. С. Круглов. Киев: Изд. УкрНИГРИ, 1986.
- Bocin, A., Stephenson, R., Matenco, L., & Mocanu, V. (2013). Gravity and magnetic modelling in the Vrancea Zone, south-eastern Carpathians: Redefinition of the edge of the East European Craton beneath the south-eastern Carpathians. *Journal of Geodynamics*, 71, 52—64. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.08.003>.
- Grabowska, T., & Wojdys, G. (2001). The border of

the East-European Craton in South-Eastern Poland based on gravity and magnetic data. *Terra Nova*, 13(2), 92—98. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00321.x>.

Yegorova, T. P., Kozlenko, V. G., Stephenson, R. A., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (1997). Preliminary 3-D density model for the lithosphere of the Dnieper-Donets Basin on the ba-

sis of gravity and seismic data. *Geofizicheskiy zhurnal*, 19(1), 124—125.

Šefara, J., Bielik, M., Vozár, J., Katona, M., Szalaiová, V., Vozárová, A., Šimonová, B., Pánisová, J., Schmidt, S., Götze, H.-J. (2017). 3D density modelling of Gemeric granites of the Western Carpathians. *Geologica Carpathica*, 68(3), 177—192. doi: 10.1515/geoca-2017-0014.

Gravity-magnetic model of the Kolomyia paleovalley for the Nadvirna—Otyniya—Ivano-Frankivsk geotravers

S. G. Anikeev, V. Yu. Maksymchuk, M. M. Pylyp'yak, 2019

The purpose of the work is development of a complex seismic-density-magnetic model of the geological cross-section for the geotraverse SG-1 (67) (Nadvirna—Otynia—Ivano-Frankivsk) and appreciation of oil and gas bearing perspectives in the Kolomyia Paleovalley. The research methodology is based on the analysis of anomalous gravity and magnetic fields and the creation of density and magnetic models of geological cross-section. Local anomalies are defined by methods of transformations. Modeling of the geological cross-section structure is performed by methods of solving direct and inverse problems of gravity and magnetic survey, which implemented the ideas of the criteria approach to creating optimal models of geological environments that are consistent with the observed geophysical fields and do not conflict with the data of drilling and seismic survey. The reliability of interpreting gravimagnetic data method is achieved by geological subordination: the condition of maximum application of seismic survey and geological and tectonic maps. The conceptual density model and magnetic model of the geological environment along the seism-geological profile of CG-I (67) was developed. The distribution of densities and magnetization of rocks in sedimentary cover and basement blocks to a depth of 20 km is detailed.

As a result of modeling within certain stratigraphic complexes, zones with anomalous in density and magnetization of rocks were defined. The decompression zones, which are within positive structures, are identified as perspective ones. It is also confirmed that there is a high probability of deep intrusions that are predicted from materials of seismic survey within the limits of the hidden tectonic zone and reaching the bottom of sedimentary cover.

The analysis of morphology of gravity and magnetic anomalies and gravimagnetic modeling allowed clarifying the geological structure of the Kolomyia Paleovalley cross-section and to appreciate oil and gas perspectives of its separate areas.

Key words: Kolomyia paleovalley, depth seismic-geological section, gravity and magnet anomalies, direct and inverse problems of gravimagnetic prospecting, density and magnetic models.

References

Andreev, B. A., & Klushin, I. G. (1962). *Geological interpretation of gravity anomalies*. Leningrad: Gostoptekhizdat, 495 p. (in Russian).

Anikeev, S. G. (1997). The computer system of solutions of the direct and inverse problems of gravity for 2D/3D models of complex environments. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i*

hazovykh rodovyshch (34), 57—63 (in Ukrainian).

Anikeev, S. G. (1999). Methods of the interpretation of gravimetric materials for complex geological environments. Candidate's thesis. Kyiv: Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 242 p. (in Russian).

- Anikeyev, S. G. (2008). About the method of modeling complex built environments in gravity. In *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (is. 5, pp. 67—72). Kyiv: TOV Karbon LTD (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G. (2010). About the way to quickly solve of the gravity and magnetic direct problems using finite-element approximations. In *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (is. 7, pp. 43—51). Kyiv: TOV Karbon LTD (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G. (2011). Solving of the direct problem of gravimagnetometry for complex models of environment using fast convolution. *Heodynamika*, (2), 18—20 (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G., Babyuk, S. G., & Stepanyuk, V. P. (2005a). Gravitational modeling on the East Dolyzna square. In *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (is. 2, pp. 75—84). Kyiv: TOV Karbon LTD (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G., Babyuk, S. G., & Stepanyuk, V. P. (2005b). Elements of faulty tectonics of the Ukrainian Carpathians on gravitational materials. In *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (is. 2, pp. 85—93). Kyiv: TOV Karbon LTD (in Ukrainian).
- Anikeyev, S., Maksymchuk, V., & Melnyk, M. (2016). Geological-gravitational modeling along the seismic geotraverse SG-1(67) Nadvirna—Otynia—Ivano-Frankivsk: *Proc. of the VI Int. sci. conf. «Geophysical technologies for prediction and monitoring of geological media», Lviv, September 20—23, 2016* (pp. 26—28). Lviv: SPOLOM (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G., Maksymchuk, V. Yu., & Melnyk, M. M. (2017). Density model of the Kolomyia Paleovalley from Nadvirnaya—Otynia—Ivano-Frankivsk geotraverse SG-I (67). *Heodynamika*, (1), 74—84 (in Ukrainian).
- Anikeyev, S. G., Maksymchuk, V. Yu., Pylypyak, M. M. (2018). Gravimagnetic modeling in the study of geological structure of the Kolomyia Paleovalley: *Proc. of the Int. sci. and technical conf. «Oil and Gas Industry: Prospects for building resource base», Ivano-Frankivsk, May 23—25, 2018* (pp. 150—153). Ivano-Frankivsk: IFNTUOG (in Ukrainian).
- Bulakh, E. G. (2010). Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. Mathematical methods of geological interpretation of gravimetric and magnetometric data: monograph. Kyiv: Naukova Dumka, 463 p. (in Russian).
- Gintov, O. B., Orlyuk, M. I., Entin, V. A., Pashkevich, I. K., Mychak, S. V., Bakarzhieva, M. I., Shimkiv, L. M., & Marchenko, A. V. (2018). The structure of the western and central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues. *Geofizicheskij zhurnal*, 40(6), 3—29. doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000 (in Ukrainian).
- Zayats, Kh. B. (2013). Deep structure of the subsoil Western Ukraine from seismic surveys and prospecting areas for oil and gas. Lviv: LV UkrDGRI, 136 p. (in Ukrainian).
- Zayats, Kh. B., & Anikeyev, S. G. (2007). Signs of a possible enrichment of minerals subsurface phenomenon of Kolomyia's paleovalley: *Proc. of the IV Int. sci.-pract. conf. «Comprehensive study and development of natural and technogenic placers», Simferopol, September 17—22, 2007* (pp. 40—41). Simferopol: PolyPress (in Ukrainian).
- Zayats, Kh. B., Korolyuk, P. O., Belovolova, L. P. (2005). The search for new gas traps in Baden changes erosion forms paleorelief of bases of the Bilche-Volytska zone. *Mineralni resursy Ukrayiny*, (5), 23—26 (in Ukrainian).
- Zayats, Kh. B., Moroshan, R. P., & Dovhyi, I. I. (2000). Features ancient of erosional relief of the Meso-Paleozoic Precarpathian deep basis from seismic data. *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn*, (1), 60—64 (in Ukrainian).
- Kobrunov, A. I. (1985). *The theoretical basis of a criteria approach to the analysis of geophysical data (on example of the gravity problems)*. Ivano-Frankivsk: IFIOG, 269 p. Dep. Ukr SRI STI 18.02.86 T 1280-UK86 (in Russian).
- Kobrunov, A. I., Anikeyev, S. G., & Blagyy, I. I. (1987). *The complex of programs for solving the inverse problem of gravity exploration in the class of density distribution in the areal version of the Mass-3 ASIGM «Carpathians»*. Moscow: Publ. of State Fund of algorithms and programs of the USSR, No. 50870000812 (in Russian).
- Kobrunov, A. I., Petrovskiy, A. P., & Kobrunov, S. A. (2005). Evolutionary-dynamic principles in the reconstruction of structural density models of sedimentary basins. *Geofizicheskij zhurnal*, 27(3), 375—380 (in Russian).

- Mayevskyy, B. J., Anikayev, S. G., Monchak, L. S., Stepanyuk, V. P., Khomin, V. R., Kurovets, S. S., Zderka, T. V., & Manyuk, M. I. (2012). Recent studies of the geological structure and prospects of oil and gas horizons deeply immersed Ukrainian Carpathians. Ivano-Frankivsk: Publ. of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 208 p. (in Ukrainian).
- Maksymchuk, V. Yu., Kuderavets, R. S., Prosymyak, V. M., Stepanyuk, V. P., Monchak, L. S., & Bugera, V. V. (2006). Magnetic properties of the rocks of the south-eastern part of the Precarpathian depression. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovyshch*, (3), 41—49 (in Ukrainian).
- Monchak, L. S., & Anikayev, S. G. (2017). Reflection of the tectonic structure of the western region of Ukraine in gravimagnetic fields. *Heodynamika*, (2), 104—118 (in Ukrainian).
- Starostenko, V. I. (1978). *Sustainable numerical methods in gravimetric problems*. Kyiv: Naukova Dumka, 226 p. (in Russian).
- Stepanyuk, V. P., Anikayev, S. G., & Babyuk, S. G. (1989). Methods of application of the ASIGM «Carpathians». Moscow: Publ. of State Fund of algorithms and programs of the USSR, No. 50870001415 (in Russian).
- Strahov, V. N. (1995). The main directions of development of the theory and methodology of geophysical data interpretation at the turn of the XXI century. *Geofizika*, (3), 9—18 (in Russian).
- Glushko, V. V., & Kruglov, S. S. (Eds.). (1986). *Tectonic map of the Ukrainian Carpathians*. 1:200000. Kyiv: Edition Ukrainian Scientific Research Mining Institute (in Russian).
- Bocin, A., Stephenson, R., Matenco, L., & Mocanu, V. (2013). Gravity and magnetic modelling in the Vrancea Zone, south-eastern Carpathians: Redefinition of the edge of the East European Craton beneath the south-eastern Carpathians. *Journal of Geodynamics*, 71, 52—64. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.08.003>.
- Grabowska, T., & Bojdys, G. (2001). The border of the East-European Craton in South-Eastern Poland based on gravity and magnetic data. *Terra Nova*, 13(2), 92—98. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00321.x>.
- Yegorova, T. P., Kozlenko, V. G., Stephenson, R. A., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (1997). Preliminary 3-D density model for the lithosphere of the Dnieper-Donets Basin on the basis of gravity and seismic data. *Geofizicheskij zhurnal*, 19(1), 124—125.
- Šefara, J., Bielik, M., Vozár, J., Katona, M., Szalaiová, V., Vozárová, A., Šimonová, B., Pánisová, J., Schmidt, S., Götze, H.-J. (2017). 3D density modelling of Gemeric granites of the Western Carpathians. *Geologica Carpathica*, 68(3), 177—192. doi: 10.1515/geoca-2017-0014.