

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ РОДОВИЩ РУДНОЇ ТА НЕРУДНОЇ СИРОВИНИ

3.1. Критерії виявлення родовищ рудної та нерудної сировини при використанні дистанційних методів

Перед описом критеріїв виявлення рудної, нерудної сировини дистанційними методами варто уточнити, що розуміється за цими термінами. Отже, *рудною мінеральною сировиною* називають гірські породи що містять метали які можуть бути економічно вигідно видобуті в технічно чистому вигляді. Розрізняють руди монометалічні, які містять тільки один метал (хромові, залізні, золотовмісні), біметалічні, в яких два метали доступні для отримання (мідно-молібденові, свинцево-цинкові), поліметалеві, з яких витягується понад два метали (свинець, цинк, мідь, срібло та ін.) і так звані саксонські руди, до складу яких входить кобальт, нікель, срібло, вісмут, уран.

До *нерудної* (неметалічної) відноситься сировина яка не є джерелом одержання металів і яку використовують у виробництві хімічних, будівельних і інших неметалічних матеріалів (самородна сірка, природні солі, фосфорити, апатити, гіпс і т. д.). До нерудної сировини належать і рідкісні мінерали, наприклад, алмаз, графіт.

Такі корисні копалини, як вугілля, торф, сланці, нафта, газ й інші, що використовуються як паливо і є сировиною для хімічної промисловості, відносяться до горючої мінеральної сировини. Зважаючи на такий галузево-технологічний принцип поділу мінеральної сировини, варто і критерії їх виявлення розглянути окремо.

3.1.1. Критерії виявлення родовищ рудної сировини

При прогнозній оцінці території на рудну сировину використовують досить широкий загальний критеріїв, які відповідно застосовуються в залежності від генезису рудоутворення. Найбільш вживаними в геології пошуків рудної сировини за генетичною оз-

накою є структурний (структурно-тектонічний), літологічний, магматогенний і фізико-геохімічний. Серед інших критеріїв рудоносності (пошуку окремих видів зруденіння), використовуються стратиграфічні, геофізичні, геодинамічні, морфоструктурні та інші. Переважна більшість критеріїв є регіональними або одночасно регіональними і локальними. Критерії можуть бути прямими, які безпосередньо вказують на рудоносність (наприклад, наявність в районі тієї чи іншої мінералізації, або ореолів підвищених концентрацій певних металів) і непрямими геологічними передумовами (наприклад, сприятливі інтрузивні, осадові, гідротермально-метасоматичні формації і т. п.).

При дистанційних дослідженнях на перший план виступають критерії, які безпосередньо впливають на загальний вигляд космічного зображення, або формують спектральний образ ландшафту в момент зйомки. Загалом пошукові критерії, що використовуються при космогеологічних дослідженнях можна об'єднати у дві групи: 1 — структурні критерії і 2 — спектральні критерії.

Структурні критерії

Є одними із провідних факторів контролю локалізації рудної сировини. В останні десятиріччя геологи, які вивчають різні аспекти структурного контролю корисних копалин, приділяють велику увагу скритим глибинним структурам, що виявляються за допомогою дешифрування космічних знімків. Сьогодні за результатами дистанційних досліджень земної кори на всіх континентах нашої планети встановлено повсюдне поширення різного масштабу концентричних структур та розгалуженої сітки лінеamentів, лінеamentних систем. Характер поширення та співвідношення цих двох типів структур має надзвичайно великий науковий та практичний

інтерес при пошуках рудоносною сировини. Ще В. Є. Хаїн у 80-х роках минулого століття звертав особливу увагу на актуальність дослідження кільцевих і лінійних структур, проблему їх просторово-часових співвідношень [1]. З часом, вивчення лінеаментних систем, кільцевих структур різного рівня (від планетарних до локальних), в районах тектоно-магматичної активізації, платформних територіях за результатами дешифрування матеріалів космічної зйомки призвело до встановлення закономірностей в їх розташуванні і надзвичайно важливої рудоконтролюючої ролі [2–9].

В результаті, почали розрізняти два аспекти при пошуках рудної сировини на основі структурного критерію і використання дистанційних методів: одні типи структур визначають концентрацію зруденіння (незалежно від її складу), а інші — контролюють спеціалізовані металогенічні підрозділи [2]. Визначилась і низка ієрархії структурних критеріїв. Так, при їх дослідженні надзвичайно важливим (і обов'язковим!) є дотримання використання оригінальної аерокосмічної інформації різних рівнів генералізації — від субрегіонального до детального рівнів. Із зменшенням рівня генералізації зменшується глибинність одержуваної інформації і збільшується її детальність. Інформація вищих рівнів генералізації, окрім її використання для вирішення завдань відповідного рівня, обмежує довільність проведення мало контрастних геологічних меж і забезпечує цілеспрямований пошук на більш детальних матеріалах дистанційних досліджень порівняно дрібних об'єктів, які можуть прояснити геологічний сенс великих структур попередніх рівнів генералізації.

Оптимальний варіант використання структурних критеріїв при пошуках рудної сировини — вивчення регіону на трьох рівнях генералізації, причому найбільш детальний з них має відповідати масштабу запланованих робіт.

Матеріали регіонального рівня використовуються для виявлення трансрегіональних і регіональних глибинних зон розломів (лінеаментних зон), окремих найбільших лінійних дугових і кільцевих структур, геоблоків. Регіональні структурні дослідження дозволяють виявляти регіональне співвідношення металогенічних провінцій, областей, уточнювати їх будову, з'ясувати рудоконтролюючу роль субрегіональних (регіональних) структур.

Локальний рівень генералізації використовується на стадії пошукових робіт. Це надзвичайно важливий рівень з вивчення значення структурного критерію окремих металогенічних областей, зон, геоблоків. Об'єктами пошуку структурного характеру на цьому рівні є окремі регіональні розломи, лінеаменти та кільцеві структури.

На детальному рівні (рівні розвідки родовищ) критеріям структурного контролю зруденіння надається також велике значення, оскільки часто саме до елементарних геологічних структурних форм

(зон розломів, локальних диз'юнктивів, плікативних утворень, кільцевих структур, їх різноманітного поєднання (вузлів перетину лінійних та кільцевих утворень) приурочені магматогенні локальні рудоносні об'єкти (інтрузії різних розмірів, кратери, кальдери, субвулкани, трубки вибуху, дайки і т. п.). Вздовж лінійних ослаблених зон, за рахунок підвищеної проникності, могли формуватися, на попередніх стадіях тектогенезу, гідротермальні зони з поліметалічною і золоторудною мінералізацією.

Особливої уваги, з позицій застосування структурних критеріїв, має виявлення на матеріалах дистанційних зйомок кільцевих структур діаметром від десятків метрів до перших сотень. Оскільки вони, переважно в умовах неглибокого залягання кристалічного фундаменту, часто відповідають конкретним геологічним об'єктам: інтрузивним куполам і окремим вулканічним структурам, які в таких умовах, приурочені до рудолокалізуючих регіональних та локальних лінійних розломів (лінеаментів).

Можливості вирішення таких найважливіших завдань структурного вивчення рудних полів, родовищ обумовлюються такими властивостями аерокосмічних знімків, як ефектом генералізації та “одномиттевого” в цілому огляду металогенічних провінцій, рудних областей, зон, геоблоків, районів, вузлів, полів і родовищ.

В цілому, структурних ситуацій, сприятливих для концентрації зруденіння достатньо багато. При цьому, варто звернути увагу на те, що основну роль (в усіх випадках) відіграють вузли перетину глобальних, регіональних і локальних ослаблених зон (лінійних наскрізних зон підвищеної тріщинуватості гірських порід), які є відгомонам глибинних дислокацій. Очевидно, що поєднання сприятливих структурних чинників є відмінною рисою позицій найбільших і унікальних рудних об'єктів.

Відзначаючи провідну роль структурних критеріїв при виявленні рудної сировини за дистанційними даними варто коротко зупинитись на проблемі існування (до сьогодні!) різних поглядів трактування поняття “лінеамент” (за результатами дешифрування матеріалів аерокосмічної зйомки), в поєднанні із класичним розумінням поняття “розлом”. Це викликано тим, що далеко не всі геологи, особливо геологи виробничих структур, віддешифровані на матеріалах дистанційних зйомок лінеаменти ототожнюють з розломами в класичному їх розумінні.

Саме по собі поняття “лінеамент” (лінія, риса) з'явилося на початку ХХ-го століття в роботах американського геолога В. Хоббса [10–11], який визначав цим терміном всі видимі лінійні межі геологічного середовища, незалежно від їх параметрів та генезису. Це термінологічне поняття В. Хоббса свого часу (1904–1911 рр.) піддавалося досить різкій критиці, проте продовжило своє існування в працях Г. Штілле, який виділив “кардинальні лінеаменти Європи” і

надавав їм, як “давнім” структурам, важливого значення у формуванні структурних планів наступних тектонічних епох. Д. І. Мушкетов під терміном “лінеамент” розумів прямолінійні сейсмотектонічні дислокації, а Р. О. Зондер на прикладі лінеаментів Західної Європи в 1938 році заклав основи лінеаментного аналізу (або лінеаментної тектоніки) [12]. У зв’язку з цим, визначення поняття лінеаментів (-ту), що приводяться багатьма авторами, відображають самі різні аспекти геологічної природи таких структурних форм, які то відображають їх вираженість в будові рельєфу або ландшафтних складових, або, навпаки, акцентують увагу на їх зв’язок з лінійними літосферними неоднорідностями різної глибини [13–20].

Таким чином, сьогодні, поняття лінеамент (космолінеамент або космографічний лінеамент) твердо увійшло в геологічну термінологію, але розуміння його суті є і надалі, дещо неоднозначним. Не приводячи аналізу поглядів щодо розуміння цього терміну за різними дослідниками, пропонуємо вважати лінеамент як лінійну аномалію дистанційного зображення, що характеризується, як правило, значним (в десятки чи сотні раз) перевищенням довжини над шириною і виражається на окремих відрізках спрямленими елементами геологічної структури, елементами тектонічної будови, спрямленими ерозійно-денудаційними чи акумулятивними формами рельєфу, часто ледь помітною різницею тону зображення, пов’язану із геоботанічними, гідрогеологічними, ґрунтовими та іншими особливостями ландшафтів, які відобразились на космоаерознімках. Лінеаменти це специфічний клас структур, які мають генетично глибинне походження, і які можуть бути не лише розломами, а й частіше є своєрідними тріщинними структурами, що утворюють системи розривів витриманого напрямку і переважно не залежать від тектонічної будови регіону. Подібні структурні форми формуються під впливом полів напруг різного рівня і масштабу.

Одним із різновидів структурних критеріїв виявлення родовищ рудної сировини на основі використання методів дистанційних зйомок є структурно-геоморфологічні критерії, або морфоструктурний аналіз рельєфу, що на сучасному етапі базується на цифрових моделях рельєфу, побудованих на основі супутникових даних (SRTM, ASTER). Методика такого аналізу для регіонального та локального прогнозів зруденіння розроблена для цілого ряду областей орогенної тектоно-магматичної активізації [5–7].

Морфоструктурний аналіз дозволяє здійснювати структурне районування областей довготривалих стійких піднять та виділяти різноманітні структури тектоно-магматичних аномалій: підняття, куполи, кільцеві структури вулканічних областей, складні очагові структури рудних полів та вузлів, рудоконтролюючі наскрізні структури, скриті розломи фундаменту, блоки різних порядків і т. п., які мають

важливе значення для аналізу закономірностей розміщення і прогнозу ендегенного зруденіння. Морфоструктурний аналіз, сьогодні, використовує спеціальні методи оброблення цифрових моделей рельєфу, а також окремі методичні прийоми геоморфологічного дешифрування аерокосмічних знімків різної просторової розрізненості.

Таким чином, структурні критерії пошуків рудної сировини дистанційними методами представляють собою геологічне (переважно структурне) і структурно-геоморфологічне дешифрування матеріалів супутникових зйомок з аналізом цифрових моделей рельєфу у форматі 2D і 3D.

Спектральні критерії

В останні десятиліття при пошуках корисних копалин, почали застосовувати методи прямого розпізнавання рудоносних порід і супутньої мінералізації за допомогою спектрального аналізу матеріалів багатозональних і гіперспектральних космічних зйомок. Застосування спектральних методів для геологічних досліджень розвивається в декількох напрямках: картування гірських порід, пошук рудних родовищ корисних копалин за гідротермальними змінами, пошук родовищ вуглеводнів за низькотемпературними змінами порід [21, 22].

Фізичною основою спектрометрії супутникових даних при геологічних дослідженнях є наявність відмінностей спектральних сигнатур різних порід і мінералів у ближній (NIR), короткохвильовій (SWIR) і довгохвильовій (тепловій) (TIR) зонах спектру. Для вимірювання та реєстрації спектральних властивостей використовуються космічні (або літакові) багатозональні сканери і наземні спектрометри. Основними джерелами космічних матеріалів у геолого-пошукових цілях є супутники Landsat, EO-1 (Hyperion) та, особливо, TERRA (ASTER). Останній, при ширині смуги огляду 60 км, має 4 канали у видимому та NIR (0.52–0.86 мкм) діапазоні, 6 каналів у SWIR (1.60–2.43 мкм) і 5 каналів у TIR (8.12–11.65 мкм) діапазонах, що дозволяє виконувати спектральний аналіз космічних даних з найбільшою наближеністю до спектральних бібліотек порід і мінералів, отриманих у польових та лабораторних умовах.

Супутниковий сенсор Hyperion дозволяє отримати данні у 220 каналах спектру, але його діапазон обмежено довжиною хвиль 0.35–2.5 мкм і широтою смуги зніманні 7.5 км. Сенсори супутника Landsat 8 при ширині смуги огляду 185 км знімають у 5 каналах видимого і NIR (0.43–0.88 мкм), трьох SWIR (1.36–2.30 мкм) і у двох TIR (10.30–12.50 мкм) діапазонах, що менше ніж у супутника TERRA (ASTER). Таким чином, на сучасному етапі в якості головного інструмента при дистанційних пошуках рудних корисних копалин за спектрометричними критеріями, варто використовувати дані сенсора ASTER, а допоміжними — Landsat 8 OLI/TIRS та EO-1 (Hyperion).

Результати досліджень в різних частинах світу

показали, можливість літологічного картування, успішне виявлення комплексів порід, що мають в своєму складі кварц, глинисті мінерали, ярозит, алуніт, сульфати. Наведено багато прикладів виявлення та картування за допомогою керованих класифікацій окремих типів магматичних, осадових і метаморфічних порід, в т. ч. гідротермально змінених, особливо у випадках, коли вони займають відносно значну площу. На основі пошуку змінених гірських порід за спектральними методами в Шоколадних горах (Каліфорнія, США) виявлялись локалізації золоторудних проявів в кварц-біотитових гнейсах і мусковітових сланцях докембрійського фундаменту. Застосовувався спектральний аналіз супутникових даних і при пошуках мідно-молібденових порфірових, залізородних та золоторудних родовищ різного генезису [22–26].

Принципове значення застосування критерію прямого розпізнавання рудоносних порід та літогеохімічних аномалій, або гідротермально змінених порід шляхом спектрометричного аналізу супутникових матеріалів має геологічна “відкритість” гірських порід. Так, всі відомі зарубіжні дослідження у західній півкулі, на різних родовищах в Арізоні, Неваді, Каліфорнії (США), Мексиці, горах Аргентини, Чилі та у Східній півкулі, у перспективних районах Єгипту, Ірану, Китаю, Австралії та ін. отримали позитивні результати тільки у гірських областях з “відкритою” геологічною будовою [21–26]. При наявності рослинного або ґрунтового покриву розпізнавання ускладнюється або стає майже неможливим. Переважна більшість території України, за виключенням окремих районів Закарпаття має негативні умови для запровадження спектрального критерію при пошуках рудної сировини. Пояснюється це, як перекритістю рудоутворюючих порід осадовими відкладами, так і суцільним розповсюдженням лісової та сільськогосподарської рослинності. Разом з тим, в останні десятиріччя розвиваються методи та прийоми дистанційного зондування рудоносних територій на основі досліджень спектрометричних характеристик яскравості рослинного покриву у межах рудопроявів і на окремих ділянках [27, 28].

Результати проведених в останні роки досліджень в цьому напрямку надають певного оптимізму, адже методи дистанційного зондування, засновані на дистанційних спектрометричних вимірах відбивних характеристик рослинних угруповань, можуть бути індикаторами геологічних об'єктів, які мають рудоносне значення. Цей напрямок розвивається в його межах отримані певні результати і намічені шляхи подальшого вдосконалення. Перші спроби комплексування супутникових спектрометричних і геохімічних даних виконано на Біганьському золото-поліметалічному родовищі у Закарпатті [29].

3.1.2. Критерії виявлення родовищ нерудної сировини

Всі корисні копалини за генетичними ознаками поділяються на магматичні метаморфічні, осадові та хемогенні родовища. Тому вже на стадії геологічних знімальних робіт літолого-стратиграфічне картографування в певній мірі окреслює поле пошуку певної сировини і чітко прив'язується до певних геологічних утворень. Починаючи з 50 років минулого століття у розвинених країнах світу та з 60 років у СРСР та в Україні в практику геолого-знімальних, структурно-картувальних, та структурно-пошукових робіт почали залучатися аерофотоматеріали, які сприяли більш чіткому визначенню, оконтуренню і оцінюванню певних літолого-стратиграфічних комплексів, що вміщують ті чи інші корисні копалини.

За технолого-економічними ознаками нерудні корисні копалини поділяються на паливну (горючу), гірничотехнічну, будівельну сировину, сировину для металургійної промисловості, коштовне та колекційне каміння — всі вони мають різний генезис, літологічний склад, час утворення, свої критерії для виявлення тієї чи іншої корисної копалини.

При застосуванні аерокосмічних матеріалів використовуються:

1) прямі ознаки, що відображають на матеріалах аерокосмічної зйомки безпосередньо дешифрований об'єкт за його спектральними чи текстурно-структурними характеристиками;

2) непрямі ознаки, які через певні індикатори — рослинність, ґрунти, обводненість розвиток екзогенних геологічних процесів дозволяють визначити місце знаходження пошукових об'єктів. Наприклад, карстові форми (западини), які добре дешифруються на знімках, свідчать про близьке залягання порід, що карстуються таких як крейда, гіпс, ангідрит. Еолові дюни і пасма, що також чітко дешифруються на дистанційних матеріалах є пошуковими критеріями нерудних корисних копалин, а саме піску.

Потрібно відмітити, що геологічне дешифрування аерокосмічної інформації має велику різноманітність форм і змінність образу в залежності від варіантності пошукової інформації, особливо при дослідженні певних корисних копалин, тому в кожному конкретному випадку розробляється своя методика і технологія використання супутникових даних.

Все ж дистанційний образ геологічної структури і пов'язано з нею нерудною копалиною, в першу чергу залежать від літолого-фаціального складу приповерхневих порід, існування взаємозв'язків між рельєфом, рослинністю та геологічним середовищем.

Нажаль, значна втрата геологічної інформації на дистанційних матеріалах викликається порушенням геологічного середовища в результаті антропо-

генного освоєння території. Через вплив техногенезу на геологічне середовище значно змінюється дистанційний образ і втрачається геологічна інформативність супутникових даних.

Результати дешифрування приповерхневих відкладів, особливо осадових товщ, для пошуку будівельних матеріалів більше залежать від аналізу рисунку і спектральної яскравості зображення, рідше від індикаційних ландшафтних ознак. Більш глибокі і поховані структури потребують застосування структурно-геоморфологічного аналізу цифрових моделей сучасного рельєфу, побудованих за матеріалами космічних зйомок (SRTM, ASTER).

Головною вимогою при пошуку покладів будівельної сировини є її легка транспортна доступність для

видобування, значні запаси і достатні об'єми для видобування, приповерхнєве залягання покладу та значний попит у народному господарстві. Тож дистанційні матеріали допомагають в окресленні місць розповсюдження покладів, визначення найближчих шляхів до споживача. Переробка та використання будівельної сировини, як правило, відбуваються на місці видобутку (гіпс, вапняк, граніт), або в разі широкого розповсюдження сировини (глина, пісок, суглинки тощо), максимально приближена до споживача.

Основними методами виявлення родовищ нерудної сировини є геоморфологічний (структурно-геоморфологічний) та спектральний аналіз дистанційних зображень.

3.2. Методика пошуку рудної сировини на основі інтегрування дистанційних і наземних спектрометричних даних

Геологічні дослідження пошуків рудної сировини з використанням матеріалів дистанційних зйомок сьогодні є невід'ємною складовою частиною всіх стадій державного геологічного вивчення території України і використовується (в усякому випадку, має обов'язково використовуватись!) при всіх геологічних роботах [30, 31]. Безумовно, при цьому кожен вид геологічних досліджень має свою специфіку і, відповідно, методичні підходи застосування дистанційних методів.

При дослідженнях з виявлення рудної сировини (металогенічних дослідженнях) важливою методичною передумовою застосування матеріалів дистанційних зйомок є геологічна відкритість або закритість території досліджень, тобто чи рудоносні породи:

- а) безпосередньо виходять на денну поверхню;
- б) перекриті тільки четвертинними товщами, ґрунтом — без рослинного покриву;
- в) перекриті, в залежності від фізико-географічних умов, тим чи іншим різновидом рослинного покриву.

У більшості випадків, за матеріалами дистанційних зйомок, критерії структурного характеру можуть бути використані (в тій чи іншій мірі) в будь-яких природних умовах, у всіх трьох випадках. Визначення речового складу гірських порід можливо лише коли рудоносні породи безпосередньо виходять на денну поверхню. Тобто, коли йдеться про геологічну відкритість регіону, коли на знімках вдається виділити і оконтурити геологічні тіла різного складу (визначити належність порід до певної групи: карбонатних, теригенних, інтрузивних або ефузивних і т. п.), але при цьому, рудоконтролюючий зміст однозначно визначити важко. Відразу ж зауважимо, що територія України майже повністю є геологічно закритою територією, і в цьому випадку лівова частка дистанційної інформації належить

вивченню значення структурних критеріїв і в незначній мірі для одержання корисної інформації за спектрометричними дослідженнями. Таким чином, методичні підходи, за рахунок відкритості геологічних порід базуються на розробці питань металогенічного аналізу з прогнозування і пошуків шляхом виявлення і картування, як правило, різних структурних елементів (лінементів, кільцевих структур, їх сполучень тощо) і в незначній мірі (науково-експериментальному порядку) розпізнавання рудоносних ділянок навколо рудних порід шляхом дистанційних та наземних спектрометричних вимірювань.

В цілому, сучасна методологія дистанційних металогенічних досліджень (пошуках рудної сировини) базується на інформаційному інтегруванні даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, дистанційної та польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних. Загальним вихідним методичним положенням є розуміння того, що металогенічний таксон є складовою частиною системи більш високого рівня і в той же час сам є системою, що містить ряд елементів (металогенічних таксонів) наступного рівня організації рудної речовини (табл.3.1). Відповідно до зазначеного, проведення металогенічних досліджень на рівні розвідки родовищ мають базуватись на більш дрібномасштабних дослідженнях — регіонального вивчення та пошукових робіт. Результати вивчення регіонального рівня повинні бути структурним каркасом металогенічних карт, що визначають стратегію більш детальних досліджень, які є основою для аналізу відповідних металогенічних і інших даних при безпосередньому виявленні рудоносних полів, родовищ.

Оскільки за матеріалами дистанційних зйомок критерії структурного характеру при металогенічних дослідженнях є визначальними, зупинимось на

Таблиця 3.1.

Металогенічні таксони і геологічні структури як об'єкти дешифрування при пошуках рудної сировини

М-б (стадія) досліджень	Досліджувані об'єкти.	Геологічні структури		
		За площею	Лінійні	Кільцеві
Регіонального вивчення 1:500 000 (1:1000 00000)– 1:200 000	Металогенічні провінції, системи, області, зони, геоблоки	Складчасті системи, області, плити, щити, хребти Структурно-формаційні зони, підзони, серединні масиви, западини, синеклізи, антиклізи, геоблоки	Трансрегиональні системи порушень (зони лінеаментів) Регіональні глибокі зони розломів, наскрізні системи порушень, Трансрегиональні лінеаменти	Мегаскладіння, протоплатформні структури, граніто-гнейсові овалюїди Кільцеві структури, ізометричні ареали гранітоїдов, вулкано-тектонічні системи, граніто-гнейсові купола
Пошукових робіт 1:100 000– 1:50 000	Рудні зони, рудні райони	Локальні блоки	Лінеаменти, зони розривних порушень, блокові наскрізні системи порушень (схристі глибокі структури)	Купола й западини інтрузивні, вулкано-тектонічні структури, кальдери, метаморфогенні структури
Розвідка родовищ 1:25 000– (1–10 000)– 1:5 000	Рудні вузли	Елементарні аномальні блоки, локальні рудоносні структурні форми	Лінеаменти, розломи, вузли їх перетинання, зони підвищеної проникності та тріщинуватості	Магматогенні локальні структури (інтрузії, субвулкани, кратери, кальдери, дайки, малі інтрузії строкатого складу, трубки вибуху)

деяких методичних підходах цього напрямку, розкриваючи основні її технологічні етапи (рис. 3.1).

Формування бази даних

Формування бази даних, особливо матеріалів дистанційних зйомок, має досить важливе значення. Адже, сьогодні в арсеналі державних та комерційних структур світу накопилась (і продовжує накопичуватись) величезна кількість широкого спектру матеріалів космічних зйомок. Дистанційні дані охоплюють широкий діапазон як електромагнітного спектру, так і за просторовою розрізненністю. Види, параметри та інші характеристики зйомок досить детально викладені в численних публікаціях та електронних ресурсах [32], тому ми наведемо мінімально необхідний дистанційний ресурс зйомок, який є достатньо інформативним при вивченні рудоносних територій. Безумовно, інформативність дистанційних зйомок (особливо багато- та гіперспектральних) для визначення проблем рудоносності гірських порід потребує подальших досліджень.

Принциповим при металогенічних дослідженнях в роботі з аерокосмічними даними є обов'язкове використання в різних масштабах оглядовості і, відповідно, детальності зображень. Вимоги до детальності означають, що на знімках повинні чітко розрізнятися геологічні об'єкти найменшого пошукового розміру, наприклад магматогенні локальні структури, дайки, трубки вибуху і т. п. І навпаки: чим більше різних об'єктів потрапляє одночасно в поле зору, тим більша ймовірність коректної ідентифікації лінійних, кільцевих об'єктів, впевненого виз-

начення їх меж та напрямків простягання. Як приклад, для забезпечення оглядовості і детальності, для території України, можна використовувати комплект дистанційних багатоспектральних зображень із таких космічних носіїв: для регіонального вивчення TERRA/AQUA (MODIS), Landsat-4,5 (TM), Landsat-7 (ETM+), Landsat-8 (OLI/TIRS), Sentinel-2 (MSI), пошукових робіт TERRA (ASTER), EO-1 (ALI, HYPERION), розвідки родовищ IKONOS, RapidEye, QuickBird, GeoEye, OrbView, WorldView 1-4, Pleiades-1A, 1B і т. п. Всі дистанційні матеріали з метою їх коректного використання мають пройти радіометричну та геометричну корекцію.

Безумовно, при формуванні бази даних не потрібно нехтувати наявними матеріалами топографічних зйомок на території досліджень, в т.ч. і глибоко архівним, з яких можна отримати інформацію про стан ландшафтів до їх активних техногенних перетворень.

Суттєвого і обов'язкового значення при використанні матеріалів дистанційних зйомок в процесі рудопошукових об'єктів має формування бази даних класичних геологічних геофізичних, геохімічних, мінералогічних та ландшафтно-геоморфологічних досліджень, які мають бути векторизовані і приведені до коректної роботи в ПС-програмах.

Дешифрування

Методико-технологічний етап дешифрування передбачає проведення комплексу робіт, базовим з яких є структурне дешифрування матеріалів дистанційних зйомок з проведенням наземних геолого-ландшафтних та спектрометричних досліджень, оброблення



Рис. 3.1 Методико-технологічна схема пошуків рудної сировини на основі матеріалів багатоспектральних дистанційних зйомок

багатоспектральних аерокосмічних зображень (фільтрації, класифікації і т. п.) та їх інтерпретація. Завершується етап валідацією отриманих даних.

При пошуках рудної сировини основну увагу при дешифруванні знімків приділяють отриманню структурної інформації, на отримання так званого структурного “скелету” карти прогнозних рудонос-

них об'єктів. Матеріали дистанційних зйомок дають змогу виявляти практично весь комплекс структурно-тектонічних елементів (розривних і складчастих дислокацій всіх рангів, кільцевих і блокових структур). Вирішення завдання створення структурно-тектонічного каркасу досягається методом структурного дешифрування [33–38].

Незважаючи на вже усталені методичні підходи до структурного дешифрування, виділення на космічних зображеннях Землі розломів, різноманітних лінеаментів і кільцевих утворень має певні, труднощі. Оскільки отримання тематичної, особливо геологічної, інформації з зображення земної поверхні шляхом дешифрування є процесом творчим, який майже не піддається формалізації. Крім того, складність ще полягає в тому, що з одного боку, на дистанційному зображенні відбивається надмірна кількість непотрібних геологів даних, а з іншого — в незначній кількості корисної інформації. У загальному випадку переважна частина відомостей, одержуваних з матеріалів дистанційних зйомок, відноситься до форми, розмірів геологічних об'єктів і їх взаємного розташування в просторі. Інформація про речовинний склад об'єктів має набагато менше однозначності навіть при великомасштабних роботах, так як вона часто завуальована техногенними та іншими чинниками. Тому, наприклад, існують різні схеми дешифрування однієї і тієї самої території, з використанням одних і тих самих вихідних матеріалів, але розроблені різними авторами. Різняться й критерії, якими керувалися дослідники, виділяючи лінеаменти і кільцеві утворення. Ще більш різноманітними є підходи до геологічної інтерпретації лінеаментів і кільцевих утворень. Така різноманітність пояснюється великою кількістю чинників, які визначають геологічну інтерпретаційну модель.

Структурний метод базується на комплексному використанні контрастно-аналогового і ландшафтно-індикаційного підходів дешифрування дистанційної основи, контурній фіксації структурних форм і контрастах дистанційного зображення.

На матеріалах аерокосмічних зйомок найбільш легко і переконливо, практично в усіх геолого-географічних умовах, виявляються лінеаменти різних за розмірами рангів та стрімкопадаючі розривні порушення (скиди, зсуви, скидо-зсуви, підкиди). Їх індикатори відносно нечисленні і об'єднуються в три групи — геоморфологічні, ґрунтово-рослинні та гідрогеологічні [39–41].

Дешифрування лінійних структур

З усіх видів структурних елементів за даними аерокосмічних зйомок найбільш легко і переконливо, практично в усіх геолого-географічних умовах, виявляються лінеаменти різних за розмірами рангів та стрімкопадаючі розривні порушення (скиди, зсуви, скидо-зсуви, підкиди). Їх індикатори відносно нечисленні і об'єднуються в три групи — геоморфологічні, ґрунтово-рослинні та гідрогеологічні [10–12]

Важливими даними для інформаційного інтегрування при металогенічних дослідженнях є отримання та застосування цифрових моделей рельєфу (DEM), які зроблені за відповідною методикою на

основі космічного сканування земної поверхні (радіолокація).

Геоморфологічні індикатори найпоширеніші і найнадійніші. Вони представлені такими формами:

- денудаційні гряди, які своїм виникненням і вираженістю в рельєфі зобов'язані жилам, дайкам, лінійно витягнутим малим інтрузіям, брекчіям, які виповнюють зони розломів;
- уступи в рельєфі, що виникають при диференційованих переміщеннях тектонічних блоків або за рахунок процесів вибіркової денудації;
- лінійно розміщені пониження в рельєфі різних розмірів, як правило, видовжені, але іноді мають і неправильну конфігурацію. Це улоговини, западини, невеликі озера, заболочені ділянки;
- лінійні елементи ерозійної мережі.

Ґрунтово-рослинні індикатори використовуються переважно в районах, які не мають суцільного рослинного покриву. Вони представлені індивідуально вираженими на матеріалах зйомки рослинними угрупованнями, пов'язаними з різною зволоженістю ґрунтового покриву або з характерними рисами ґрунтів, зумовленими складом порід.

Ґрунтово-рослинні індикатори можуть трасувати розривні порушення за рахунок їх приуроченості до місць підвищеного зволоження (у випадках, коли розломи є водоносними зонами), контакти порід різного складу (які також часто є водоносними зонами).

Гідрогеологічні індикатори нечисленні, тісно пов'язані з ґрунтово-рослинними і, як правило, використовуються при трасуванні розривних порушень разом з ними.

Розглянуті індикатори характеризують одиничні розривні порушення, лінеаменти. Складніші утворення — зони розломів, зони дроблення і меланжу, глибинні розломи є складними системами поодиноких розломів приблизно одного напрямку, індикатори яких в межах зони можуть бути витримані за простяганням, а можуть і змінюватися. Розривні порушення такого класу є межами, за якими контактують генетично різні геологічні тіла і (або) структури, проявлені, як правило, у вигляді пограничних зон між різними природно-територіальними комплексами.

За критерієм довжини розломи, лінеаменти можна класифікувати на трансрегіональні, регіональні і локальні. Не менш важливе значення має класифікація лінійних структур за критерієм їх планової орієнтації, тобто за домінуючими напрямками простягання. Ці напрямки однаково властиві як для гірських регіонів, так і для платформ. Витриманість мережі простягання лінеаментів зумовлена ротаційним напруженням верхньої товщі земної кори. Це так звані ротаційні напруження, які адекватні неотектонічно реліктованим розривним лінійним структурам планетарної тріщинуватості.

Дешифрування складчастих дислокацій

При дешифруванні складчастих дислокацій (структур), на відміну від лінійних структур, велику роль відіграє відкритість (відслоненість) геологічних порід на поверхні, тобто відсутність покриву четвертинних відкладів, рослинності над ними. В умовах доброї відслоненості, і невеликої потужності четвертинних відкладів і рідкому рослинному покриві, на матеріалах аерокосмічних зйомок можна простежити окремі пласти і їх шаруватість. Складки можуть виявлятися безпосередньо за геометрією малюнка виходу шарів порід на денну поверхню. Проте такі геолого-ландшафтні умови на території України зустрічаються вкрай рідко і здебільшого доводиться мати справу з опосередкованими ознаками складок.

Найбільш чутливим індикатором складок є ерозійна мережа. За її малюнком — концентричним, радіально-концентричним (округлим або овальним у плані), доцентровим або відцентровим можна без особливих зусиль можна визначити тип складки.

Складчасті деформації найвиразніше дешифруються в шаруватих породах. Що більші речовинні і колірні відмінності суміжних шарів, тим впевненіше виявляється малюнок складчастості. За характером ерозійного розчленування можна виділити і неотектонічні куполоподібні підняття. Вони, як правило, характеризуються збільшенням інтенсивності розчленування. На передкупольних ділянках долин річок спостерігається їх підпирання і виникнення озероподібних розширень. Наявність аномальних ділянок долини річки також може свідчити про наявність підняття (в першому випадку річка прорізає підняття, а в другому — огинає його).

Кільцеві структури

На матеріалах аерокосмічних зйомок, поруч із розломами, лінеаментами, складчастими дислокаціями, відображається велика кількість кільцевих утворень. Як синонім кільцевих утворень геологи частіше використовують термін "кільцеві структури" або "кільцеві неоднорідності", "структури центрального типу", "структурні неоднорідності центрального типу", "кругові", "концентричні структури" тощо.

На матеріалах аерокосмічних зйомок ці об'єкти дешифруються за загальною фізіономічною ознакою — у вигляді кільцевих, кругових, еліпсоподібних концентричних та інших тонових або геоморфологічних аномалій. Загальним правилом при їх дешифруванні є виявлення не одного замкнутого контуру, а систем закономірно орієнтованих контурів, які доповнюють один одного, що дає змогу уникнути похибок при виділенні і дослідженні кільцевих об'єктів. Як і для лінійних структур, найхарактернішою властивістю кільцевих утворень є їх повсюдний розвиток: вони існують у межах будь-яких структурно-тектонічних одиниць і поводять-

ся автономно щодо оточуючих або "вміщуючих" їх геологічних структур. Тому методично кільцеві утворення пропонується виділяти в межах однорідних генетичних рівнів окремо. Виділені об'єкти найбільш достовірні, якщо вони виявляються на серії знімків, одержаних за різних умов зйомки.

Першою досить поширеною класифікацією кільцевих утворень є їх поділ за розмірами. Так, залежно від діаметра (від десятків метрів до тисячі і більше кілометрів) структури поділяють на декілька класів [41–2]: криптоструктури (10 м); інфраструктури (10–100 м); мікροструктури (100–1000 м); мезоструктури (1–10 км); макроструктури (10–100 км) і т. д.

Після виявлення кільцевих структур найскладнішим питанням є з'ясування їх геологічної природи. Для досліджень та прогнозування рудної сировини важливе значення мають *тектоногенні та магматогенні кільцеві структури*. Тектоногенні кільцеві структури дешифруються переважно в межах давніх і молодих платформ. Утворення їх пов'язано в основному з вертикальними тектонічними рухами, підняттями та опусканнями блоків фундаменту. Позитивні структури представлені антеклізами — великими похованими підняттями (куполами) осадових структурних поверхів, фундаменту. Деякі з них зумовлені ізостатичним спливанням порівняно легких гранітоїдних масивів серед порід субстрату або деформацією осадових товщ, що перекривають блоки автохтону, які і створюють дистанційний образ кільцевої структури.

Магматогенні кільцеві структури

Розвинені як на платформах, так і в складчастих областях. З мантіїним магматизмом пов'язане утворення плутонічних структур лужно-ультраосновного складу, а також малих інтрузій, у тому числі кімберлітів, розвинених на платформах. Вулканічні і вулканоплутонічні структури невеликого діаметра, приурочені до зон глибинних розломів, характерні для трапових полів давніх платформ, складених основними темними і щільними магматичними породами. Плутонічні структури, пов'язані з коровим магматизмом, як правило, розвинені в складчастих поясах різного віку, рідше вони зустрічаються на платформах. Ці структури утворені гранітоїдним плутонізмом і представлені крупними батолітами, мають велику вертикальну потужність. Це ізометричні штоки, кільцеві і конічні інтрузії. Нерідко зустрічаються кільцеві структури, де інтрузив зовсім не розкритий ерозією. Невеликі інтрузиви зазвичай з'єднані в одну крупну кільцеву структуру, яка відображає наявність на глибині єдиного магматичного осередку. Контрастність їх на знімках залежить від глибини інтрузії: чим ближче до поверхні, тим виразніше вони проявляються.

Етап дешифрування завершується складанням попередніх картографічних геологопошукових

моделей потенційних рудних вузлів, полів, їх частин. Важливою умовою картографічних моделей є збереження принципу картування "від загального до окремого", коли більш детальна інформація вписується у загальну структурний каркас. Виявлена нова інформація потребує багатьох випадках хоча б часткове підтвердження даними інших методів. Це стосується насамперед об'єктів, які не отримали ніякого відображення на складених раніше геологічних картах, а також деяких об'єктів, що мають фрагментарний збіг з даними цих карт. Необхідність додаткового підтвердження таких об'єктів залежить як від їх рангу, так і від ступеня відповідності їх відомим геологічними даними. Чим вище ранг і менше ступінь збігу, тим необхідніше таке підтвердження.

Для обґрунтування нової інформації проводяться спеціальні наземні геолого-ландшафтні (польові) дослідження, в результаті яких отримуються геологічні дані для підтвердження ряду невідомих раніше віддешифрованих об'єктів.

Важливим методичною роботою на завершальній стадії процесу дешифрування є визначення характеру і геологічної ролі виявлених при дешифруванні дистанційних зображень нових об'єктів. Матеріалами для проведення структурно-геологічного аналізу служать геологічні карти, структурні схеми, різноманітні спеціальні карти: тектонічні, геологічні, мінералогічні, геохімічні та ін. В процесі роботи аналізуються лінеаменти різних порядків, обмежені ними блоки, а також концентричні структури. В залежності від типу і порядку цих об'єктів встановлювалися їх співвідношення з тими чи іншими елементами геологічної будови.

Критеріями, що дозволяють визначити їх роль в геологічному розвитку регіону, зазвичай використовуються структурні ознаки. Для протяжних лінійних об'єктів, інтерпретованих як розривні порушення, визначаються:

- положення в загальній структурі регіону;
- приуроченість до кордонів структурно-формаційних зон, підзон і окремих формацій;
- контроль локальних плікативних структур і магматичних утворень (дрібних інтрузивних і екструзивних тіл, вулканічних порід та ін);
- приуроченість до контактів різновікових товщ і великих інтрузивних масивів.

Лінеаменти, що обмежують концентричні структури різного діаметру, аналізуються за цими ж критеріями. Крім того, для кільцевих структур різного рангу, визначається їх значення по відношенню до вміщуючих і розташованих в середині кільцевих утворень. У ряді випадків положення цих структур варто співставляти з даними про глибинну будову, що представляє інтерес з точки зору їх можливого генезису.

При аналізі концентричних структур малого діаметра встановлюють їхню приуроченість до полів розвитку певних літолого-петрографічних комп-

лексів і наявність ряду ознак, які свідчать про достовірність цих структур. До таких ознак відносяться: прояви магматизму в зоні кільцевих контурів, присутність центральних магматичних тіл (або геофізичних аномалій, що вказують на наявність таких тіл на глибині) і куполовидне залягання порід у внутрішній частині структури. Аналіз геологічних даних, що характеризують ті чи інші кільцеві структури, нерідко дозволяє судити про їх генезис, що представляє значний інтерес у зв'язку з наявністю різних варіантів утворення цих структур.

На завершення цього етапу створюється картографічна модель-схема структурного дешифрування, яку можна розглядати як одну з структурно-геологічних основ для металогенічного аналізу. Інформація на схемі повинна задовольняти двом умовам. По-перше, мати відношення до контролю тих корисних копалин, які є предметом досліджень. По-друге, отримана інформація повинна бути підтверджена даними інших методів. Остання умова не належить до найбільш дрібних об'єктів, наприклад до передбачуваних розривних порушень локального порядку, з'ясування геологічної ролі яких зазвичай важко.

Легенда до остаточної схеми має відображати типи та ранги винесених на схему об'єктів. По рангах диференціюються розривні порушення (наприклад трансрегіональні, регіональні, локальні), кільцеві структури (наприклад по діаметру, краще за генезисом). При наявності додаткових даних, отриманих у процесі інтерпретації віддешифрованих на дистанційних даних об'єктів, серед розривних порушень можуть бути додатково виділені категорії, що відображають роль розломів в геологічній будові або їх вираженість (глибинні, наскрізні, приховані), або тип розломів (скиди, насуви та ін). Для кільцевих структур, якщо є необхідні матеріали, що дозволяють судити про їх походження, легенду бажано будувати на генетичній основі.

Металогенічний аналіз

Методично період металогенічного аналізу при пошуках рудної сировини з використанням результатів дешифрування матеріалів дистанційних зйомок є надзвичайно важливим і творчим процесом. При цьому, зміст і методичні прийоми аналізу в загальному не відрізняються від використовуваних робіт в цілому при традиційних металогенічних дослідженнях.

Аналіз металогенічної ролі нової дистанційної інформації здійснюється в двох напрямках: встановлення просторових співвідношень віддешифрованих на аерокосмоснімках структурних об'єктів і результатів спектрометричних досліджень безпосередньо з проявами корисних копалин та виявленням їх зв'язку з іншими рудо контролюючими факторами на основі ПС-технологій

В рамках першого напрямку найбільш прості та

ефективні випадки очевидною просторовою зв'язку проявів зруденіння з тими чи іншими структурними об'єктами, встановленими матеріалами дистанційних зйомок. Найчастіше ці об'єкти належать до локального рангу і представлені локальними розривними порушеннями певних напрямів або концентричними структурами малого діаметра. Ті та інші нерідко є безпосередньо рудовміщуючими. Пояснення просторової приуроченості зруденіння до таких об'єктів не є, як правило, особливих важким.

Визначення металогенічної ролі регіональних розломів, лінеаментів — більш складне завдання, що обумовлено наступним: прояви рудної сировини не завжди приурочено безпосередньо до цих лінійних елементів, хоча останні можуть бути і рудо контролюючими. Їх роль, наприклад, може зводитися до контролю серії рудних об'єктів, які тяжіють в регіональному плані до цих зон розломів, так і до обмеження тектонічних блоків, що мають різну історію геологічного розвитку і металогенічну спеціалізацію. В останньому випадку необхідно проаналізувати просторову диференціацію різних формаційних типів зруденіння з точки зору локалізації їх з виділеним блоком.

Для інтерпретації металогенічної ролі транс-регіональних розломів бажано максимально використовувати унікальні можливості дистанційних зображень, які дозволяють простежити їх за межами досліджуваних регіонів. Дані про металогенічні позиції цих розломів на суміжних територіях з урахуванням загальної геологічної обстановки можуть служити підставою для висновку про їх ролі і в межах досліджуваного регіону.

Визначення металогенічного значення концентричних структур різного діаметру, як правило, ускладнюється недостатньою ясністю їх генезису і ролі в геологічному розвитку регіонів. З урахуванням цієї обставини підхід до встановлення просторових зв'язків цих структур з рудними об'єктами здійснюється з обережністю, оскільки такі зв'язки можуть бути випадковими.

Крім регіональних закономірностей розміщення корисних копалин і зв'язків зруденіння з певними структурними об'єктами увага надається також на приуроченість рудопроявів до конкретних елементів рудоконтролюючих структур. При цьому, нерідко можна встановити закономірно повторювані варіанти локалізації зруденіння, наприклад концентрація проявів зруденіння в певних ділянках кільцевих структур малого діаметру: кільцевих зонах розломів, перетинах їх з лінійними розривними порушеннями, а також рудна зональність всередині кільцевих контурів; у місцях перетинань різноспрямованих зон розломів; у певних частинах тектонічних блоків.

Якщо пошуково-розвідувальних даних недостатньо, для інтерпретації віддешифрованих об'єктів доцільно залучати геохімічні матеріали. З цією ме-

тою при вивченні використовуються поелементні геохімічні карти. Виділені на них площинні рідко-земельні аномалії в ряді випадків можуть бути просторово суміщеними з виявленими на матеріалах зйомок лінійними та кільцевими структурами. Тим самим встановлюється структурна зумовленість геохімічних аномалій, які не завжди корелюються з геологічною будовою верхнього структурного поверху.

Другий напрямок металогенічного аналізу даних дешифрування дистанційних зйомок — виявлення просторових зв'язків, встановлених структурних об'єктів з іншими рудоконтролюючими факторами. Основними в цьому напрямку є пошуки структурного контролю рудоносних магматичних тіл, які можна розглядати в двох аспектах: знаходження тектонічних меж областей розвитку рудоносної магматизму і встановлення зон розривних порушень, безпосередньо контролюючих конкретні магматичні тіла. Хоча б часткове вирішення цих питань дозволяє, з одного боку, провести більш обґрунтоване металогенічне районування, а з іншого — спрогнозувати лінійні зони переважного розвитку магматичних комплексів, з якими пов'язане зруденіння. В аналогічні лінійні зони, що трасуються розломами, можуть групуватися і кільцеві структури малого діаметра, що особливо важливо, якщо є вказівки на їх рудолокалізуючу роль.

Прогнозні рекомендації

Металогенічний аналіз нової інформації, отриманої при дослідженнях матеріалів дистанційних зйомок, дозволяє в більшості випадків дати деякі прогнозні рекомендації. Об'єктами прогнозу, як правило, є окремі тектонічні блоки, перспективні по тим чи іншим ознакам; вузли перетину зон розломів, зазвичай за рахунок продовжень відомих рудоконтролюючих розломів або виявлених нових, раніше невідомих розривних порушень, що мають прихований характер; зони розвитку концентричних структур та вузли їх перетинів; трансрегіональні, регіональні розломи, що дозволяють екстраполювати прогноз на суміжні території або навпаки.

Розглянемо окремі позиції запропонованої методики на прикладі дистанційних досліджень на еталонній ділянці "Ястребецька" у межах Суццано-Пержанського глибинного розлому.

Стисла ландшафтно-геоморфологічна характеристика району досліджень

В адміністративному відношенні територія робіт знаходиться в межах Олевського району Житомирської області в районі селища Перга. Об'єкти досліджень розміщені на правобережжі р. Уборть, яка є найбільшою водною артерією району. Основним джерелом живлення гідромережі є атмосферні опади, які викликають повені в будь-який період року.

За схемою геоморфологічного районування район робіт відноситься до території Житомирського Полісся, з характерними для нього фізико-географічними ландшафтами і кліматичними особливостями. Рельєф території горбисто-рівнинний, характерний для флювіогляціальної рівнини, з загальним нахилом сучасної поверхні в північному і північно-східному напрямках. Абсолютні відмітки поверхні знаходяться в межах 158–175 м.

Сучасний рельєф відображає поверхню кристалічних порід: підняті ділянки співпадають з їх виходами і перекриті малопотужною товщею піщаних порід; понижені, заболочені ділянки, в загальних рисах, співпадають з заглибленнями кристалічного фундаменту. Відслоненість (геологічна “відкритість”) району погана.

Більше 90% території покрито лісом. Рослинний світ в цілому характерний для зони змішаних лісів. Серед нього спостерігаються лісові та болотні угруповання. Основними породами дерев є сосна та береза. Осика, дуб, ялина, вільха спостерігаються дещо рідше. Вік лісів 30–40 років. Широко розповсюджений підлісок, який представлений ліщиною, крушиною, шипшиною, різноманітними кущами та ягідниками. Потужність ґрунтового шару складає 0.1–0.4 м. Досить слабкий нахил сучасної поверхні і поганий вертикальний дренаж сприяють розповсюдженню заболочених ділянок і боліт, більшість яких з поверхні покриті торфовищами. Прохідність району робіт погана. Таким чином для геологічного дешифрування район дуже несприятливий.

Особливості геологічної будови Суцано-Пержанської зони

Суцано-Пержанська зона є одною із найбільш цікавих, з геологічної точки зору, структур північного заходу УЩ, що характеризується максимальною і специфічно вираженою рудоносністю, на окремих ділянках якої відомі родовища та перспективні рудопрояви рідкісних, рідкісноземельних, кольорових та благородних металів і нерудної сировини.

Суцано-Пержанська зона є трансрегіональною рудоконтролюючою структурою, що являє собою систему пограничних розломів північно-східного простягання на північному заході УЩ. Вона має протяжність більше 200 км далеко за межі УЩ і ширину до 15 км в її середній частині, що відома як Пержанське (Суцано-Пержанське) рудне поле. Останнє приурочене до вигину дислокаційної зони, де вона розсічена поперечними субмеридіональними, діагональними північно-західними і північно-східними розривними порушеннями. В межах цієї зони неодноразово проявився динамометаморфізм і орогенний верхньопротерозойський інтрузивний магматизм, до завершуючих фаз якого відноситься формування лужних сієнітів Ястребецького масиву, апогранітів пержанського комплексу і генетично пов'язаного з ними рідкіснометально-рідкісноземельного зруденіння.

В меншій мірі зачеплені динамометаморфізмом найбільш молоді граніти пержанського комплексу та лужні сієніти. Генетично пов'язані з пержанськими гранітами і метасоматитами, що несуть рідкіснометальне зруденіння, в загальних рисах наслідують гнейсовидність та сланцюватість вміщуючих порід. Що стосується рідкісноземельно-рідкіснометальної та рідкісноземельно-флюоритової мінералізації, то в просторовому розміщенні їх рудоконтролююча роль генерального північно-східного простягання директивних структур проявлена менш чітко.

В геологічній будові Суцано-Пержанської зони, і особливо її центральної частини, приймає широкий набір утворень різного віку, але найбільш розповсюдженими є специфічні породи, що віднесені до пержанського метасоматичного комплексу. По існуючому в даний час поділу вони є одним із наймолодших утворень північного заходу УЩ; серед них виділяються вторинні кварцити, кварцити з дистеном, грейзени, лужні метасоматити та сієніти, сієніти, апограніти пержанські, граніт-порфіри та сублужні граніти.

В межах Пержанського рудного поля переважають породи та утворення кислого ряду. В залежності від структурних особливостей, серед пержанських гранітів виділяються три різновиди: пегматоїдні, середньо- і дрібнозернисті. Крім того виділяються породи з звичайним і голубувато-сірим кварцом.

В геоструктурному відношенні Суцано-Пержанська зона розміщена в області тектоно-магматичної активізації. Її глибинний характер на фоні обстановки розтягування (рифтогенез) сприяли появі унікальних метасоматичних формацій з високою реальною і потенційною рудоносністю. Метасоматити різного складу тут характеризуються зв'язком з цілком визначеними магматичними породами і мають площинний розвиток (пропіліти, апограніти) або локальне — в зонах підвищеної тріщинуватості, катаклазу і мілонітизації (грейзени, вторинні кварцити, лужні метасоматити) [44–45].

Центральна частина Суцано-Пержанської зони характеризується значною рудоносністю. В її межах розвідано ряд родовищ, рудопроявів та розсипів (рис. 3.2).

Ястребецька ділянка

Відповідає Ястребецькому родовищу рідкісноземельно-цирконієвих руд знаходиться в межах центральної частини Суцано-Пержанської тектонічної зони (рис. 3.3).

В генетичному плані воно пов'язане з Ястребецьким масивом, який представлений слабоеродованим штокоподібним ефузивним тілом ізометричної форми, слабо витягненим в північному напрямку. Площа масиву 2.1 км².

Структурне положення масиву контролюється вузлом зчленування різноорієнтованих тектонічних порушень. Масив має неоднорідну будову. Ос-

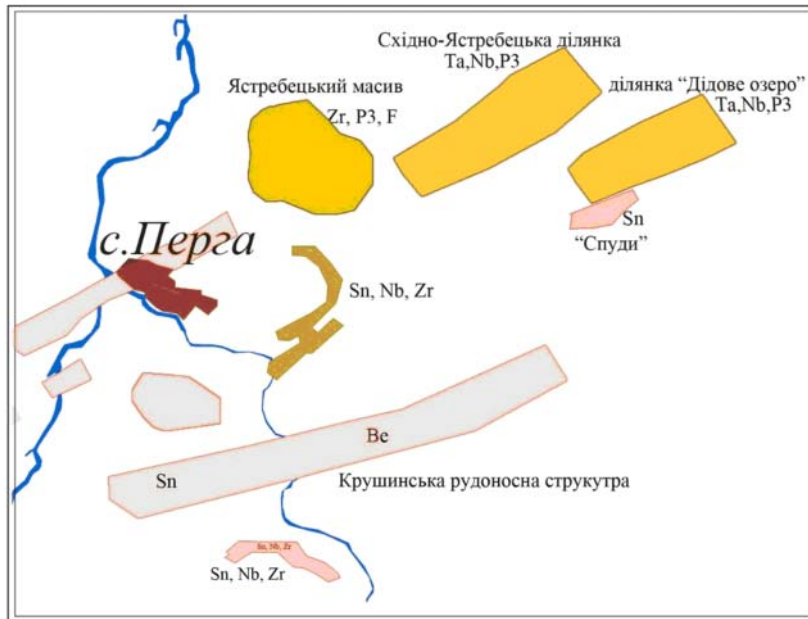


Рис. 3.2. Схема розміщення рудопроявів та розсіпів в центральній частині Сущано-Пержанської зони (Пержанське рудне поле)

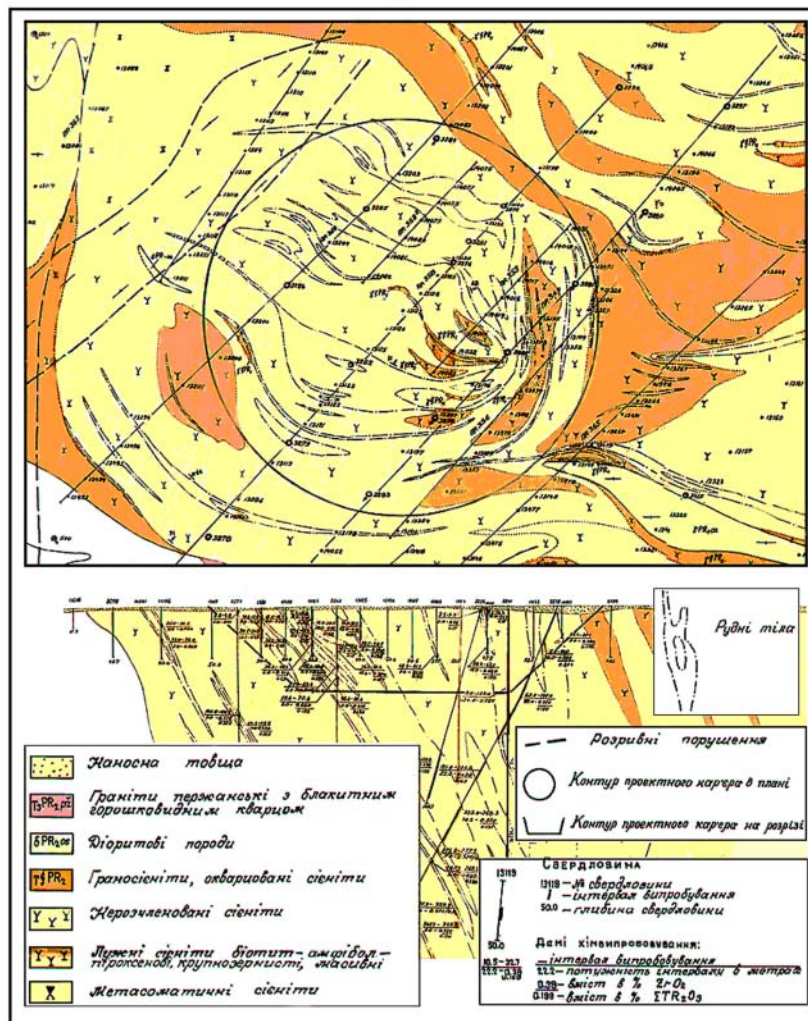


Рис. 3.3. Геологічна карта Ястребецького масиву (комплексного флюорит-рідкоземельно-цирконієвого родовища) в межах центральної частин Сущано-Пержанської зони. (За В. Л. Висоцьким та ін., 2002 р.) [45]

новна його частина складена генетично зміненими біотитами, амфіболитами, піроксенітами або їх перехідними різновидами; периферійна — окварцованими сіенітами, діоритами.

Неодноразові тектонічні переміщення в обрамленні лужних порід створили сприятливі умови для постмагматичних та метасоматичних процесів, які супроводжувались утворенням мінералізованих порід в зонах тріщинуватості та сланцюватості. Збагачені цирконієвою мінералізацією вони складають цирконієвоносну зону серповидної форми, яка огинає центральну частину масиву. В межах цієї зони виділено 38 рудних тіл довжиною від 75 до 954 м, які мають складну жилоподібну, лінійну форму [45].

Орієнтація рудних тіл контролюється кільцевою реліктовою протоструктурою і успадкованою системою тріщин, сприятливих для рудоутворення.

Головними мінералами-концентраторами рідкісних земель є флюорит, циркон та ризит. На флюорит припадає 15–35%, циркон 5–9%, решта вміщується в карбонатах. Більш 50% загального вмісту ітрію інтегровано у флюориті.

Матеріали дистанційних зйомок

В процесі досліджень проведена робота з отримання та підготовки до дешифрування матеріалів багатоспектральних космічних зйомок. Головними вимогами до матеріалів є відсутність хмарності

і наявність якісної зйомки у SWIR та TIR діапазонах.

Банк кондиційних даних, на територію досліджень в тому числі, на еталонну ділянку, на сьогодні становить більше 30 космічних зображень супутників серії Landsat, ASTER та Sentinel-2A. Створена цифрова модель рельєфу за даними космічної зйомки SRTM (рис. 3.4).

Результати дешифрування матеріалів дистанційних зйомок

Відповідно розробленій технологічній схемі пошуку рудної сировини на основі дистанційних даних (див. рис. 3.1), на другому етапі проводиться дешифрування даних дистанційних зйомок в інтерактивному режимі із застосуванням попиксельної класифікації багатозональних зображень, уточнюються ландшафтні умови, спектральні характеристики домінуючих елементів ландшафту території Ястребецького родовища.

Специфікою робіт було акцентування уваги на виявленні структурного фактору контролю зруденіння, шляхом аналізу простягання відомих рудних тіл відносно розломно-тріщинної мережі виявленої в результаті дешифрування (рис. 3.5).

Аналіз супутникових даних у різних зонах спектру і їх комбінацій дозволили протрасувати значну частину раніше невідомих лінементів і прилеглих

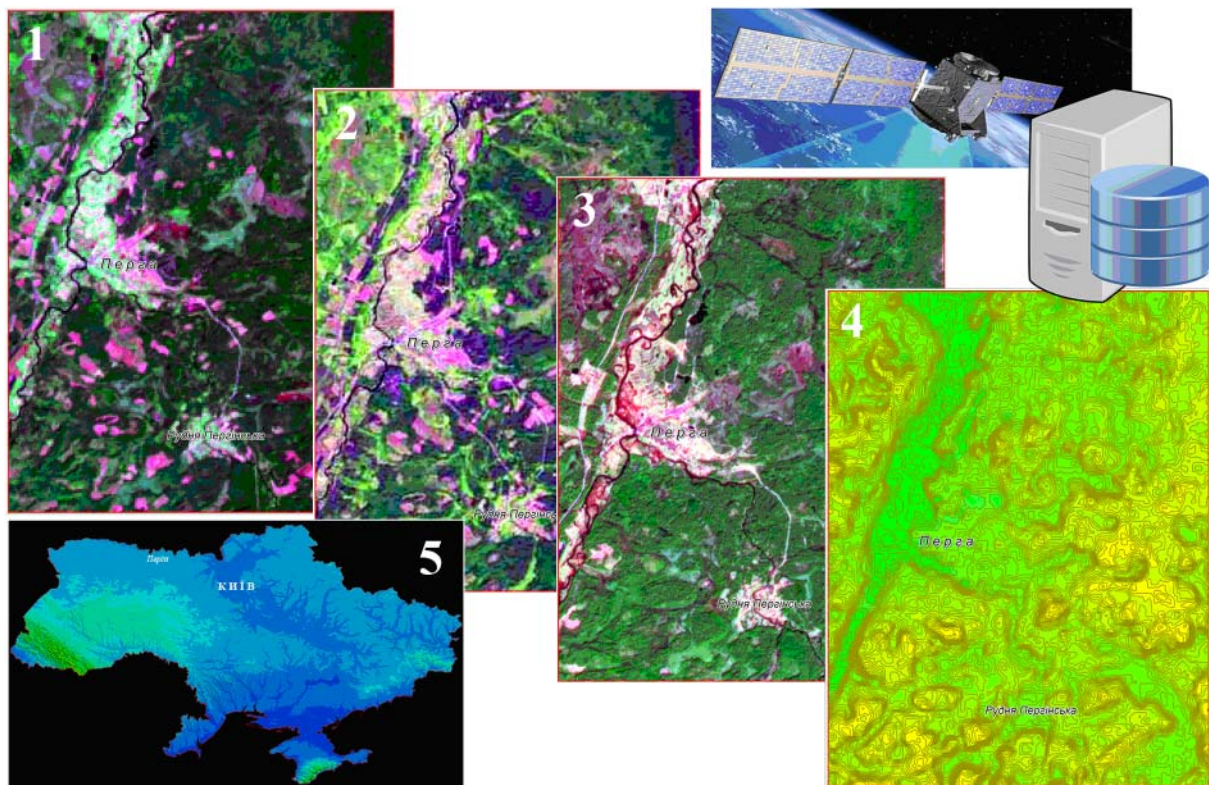


Рис. 3.4. Формування бази та попередня обробка космічних матеріалів. Приклади зведених даних: 1 — багатоспектральна зйомка Landsat 8 OLI/TIRS, кольоровий композит 7, 5, 3 канали. 2 — багатоспектральна зйомка Sentinel-2A, кольоровий композит 12, 8, 3 канали. 3 — багатоспектральна зйомка ASTER, кольоровий композит 7, 3, 1 канали. 4 — цифрова модель рельєфу, побудована на основі даних SRTM. 5 — оглядова карта рельєфу України за космічними даними з районом досліджень

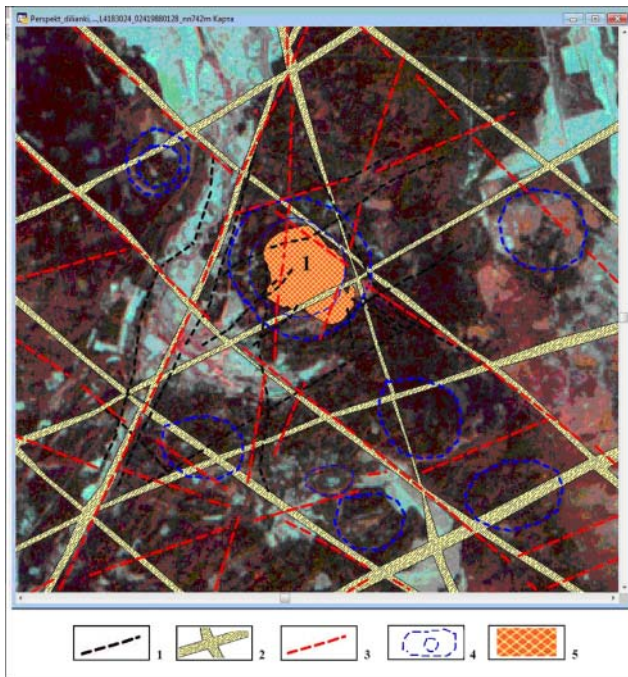


Рис. 3.5. Схема структурного дешифрування Ястребецької площі. 1 — розривні порушення за геологічними даними. Лінеаменти: 2 — регіональні; 3 — локальні. 4 — кільцеві структури різного рангу

до них структурних ускладнень. Особливо ефективно встановлюється будова структур за виявленими розривними порушеннями, які зумовлені з однієї сторони блоковими рухами, а з другої — визначають характер планового розміщення локальних форм магматогенно-очагових структур. Вивчення дешифрувальних ознак у межах космогеологічних об'єктів високого порядку показало, що переважна

більшість останніх проявляється в геометрії ландшафту, у гіпсометричному полі і інтенсивності розчленування рельєфу, а це свідчить про їх успадкований розвиток в період рельєфоутворення. Однак, ступінь їх новітньої активності сильно різниться на що вказує велике різноманіття їх проявів у ландшафті.

Аналіз даних дистанційного зондування у тепловому діапазоні показав, що завдяки різниці коефіцієнтів теплового випромінювання (прогріву) поверхневих виходів гірських порід та оточуючої рослинності з'являється можливість прогнозування положення інтрузивних масивів для умов Пержанського рудного поля (рис. 3.6).

Лінійні аномалії теплового поля у західній частині ділянки пов'язані з долиною річки Уборть, яка на цьому відрізку має спрямлену долину і успадковує один із глибинних розломів Суцано-Пержанської тектонічної зони. Іншим цікавим моментом є розташування виділених кільцевих структур (структур центрального типу) з південного сходу на північний захід, вздовж теплових аномалій аналогічного простягання, що узгоджується з простяганням розривних структур за геологічними даними.

З метою вивчення і польового спектрометрування ландшафтних і геологічних об'єктів проведено наземні дослідження. Схема розташування точок польових спостережень наведено на рис. 3.7 А. При цьому точки спостережень були вибрані (рис. 3.7 Б): в межах Ястребецького масиву на периферії Ястребецького масиву (2) і поза межами Ястребецького масиву. В результаті польових досліджень одержані спектрометричні характеристики рослинності і окремих гірських порід, в межах Ястребецького ро-

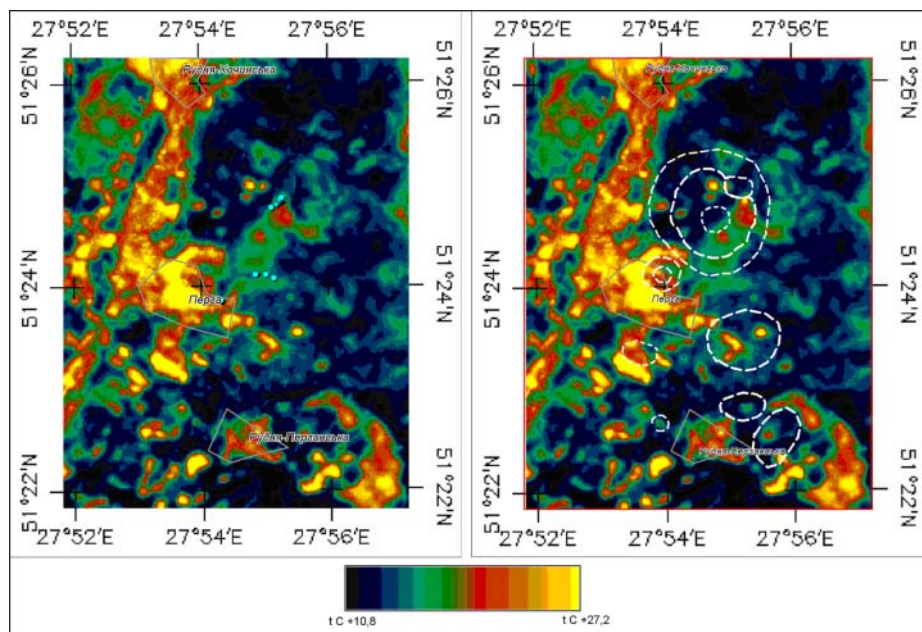


Рис. 3.6. Карта теплового поля поверхні Ястребецької ділянки за матеріалами K3 Landsat 8/TIRS 3 результатами дешифрування структур центрального типу (кільцеві структури білого кольору). Зйомка 03.05.2014 р.

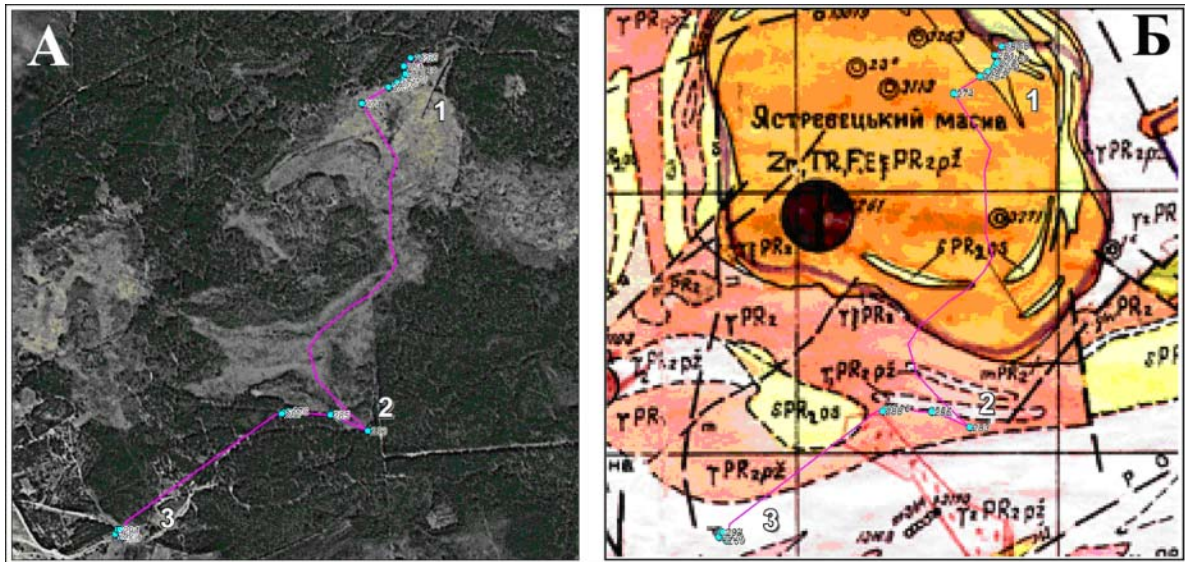


Рис. 3.7. Розташування точок польових спостережень: 1 — у межах Ястребецького масиву. 2 — на периферії Ястребецького масиву. 3 — за межами Ястребецького масиву. А — Космічна основа (КЗ QuickBird). Б — геологічна основа

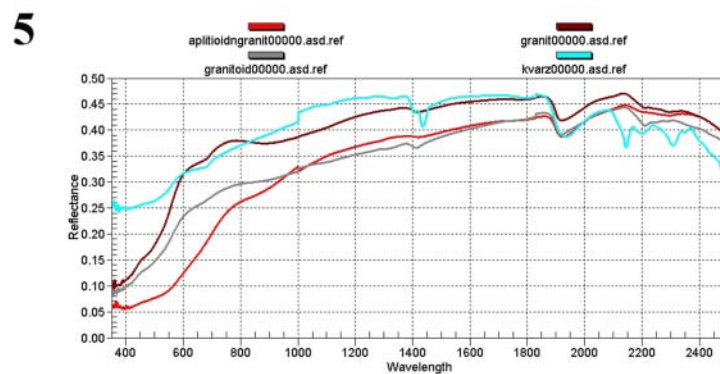


Рис. 3.8. Типові гірські породи, що виходять на денну поверхню в межах Ястребецького родовища: 1 — аплітоїдний граніт, 2 — вивітрілий граніт, 3 — гранітоїд, 4 — кварц, 5 — спектри відбиття

довища, що виходять на денну поверхню (рис. 3.8). Нажаль, до центральної частини Ястребецького масиву внаслідок суцільного заболочення потрапити не вдалося.

На стадії дешифрування проводились дослідження з визначення та апробації оптимального комплексу методів і прийомів цифрового оброблення матеріалів дистанційних зйомок. Метою цих досліджень було виявлення нової формалізованої інформації щодо ідентифікації основних

стратиграфічних та інтрузивних підрозділів Пержанського рудного поля, зокрема Ястребецького масиву.

Класифікація передбачала автоматизований поділ всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам за спектральними ознаками, тобто на основі відмінностей в значеннях спектральної яскравості. Безумовно, до аналізу, в якості спектральних бібліотек, долучались і результати польового спектрометрування (рис. 3.9).

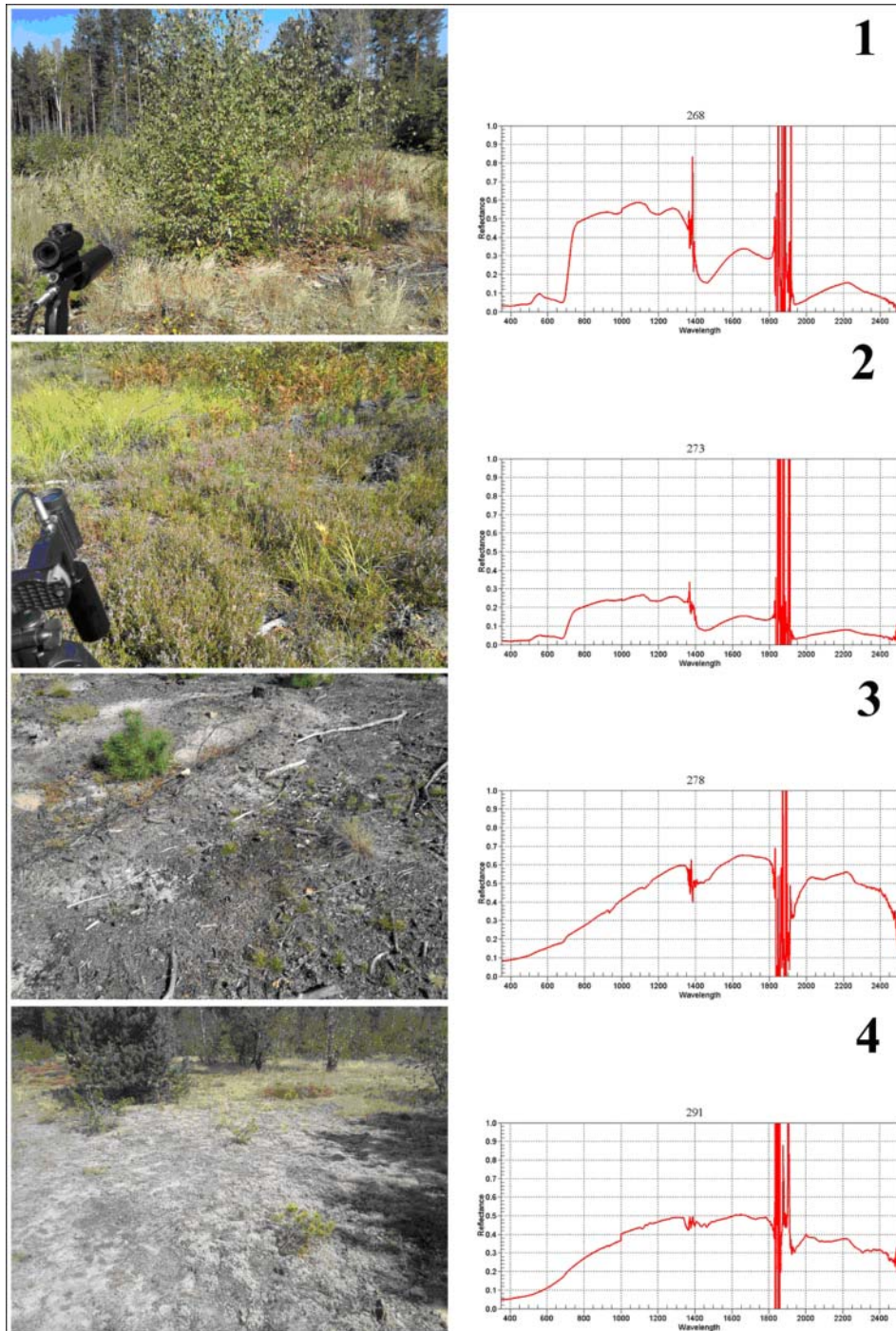


Рис. 3.9. Типові ландшафтні одиниці Ястребецького родовища та їх спектри відбиття: 1 — молодняк берези, 2 — галявини вкриті вересом, 3 — відкритий ґрунт, 4 — галявини вкриті мохом та лишайником

Основним, принципово важливим в класифікації є вірний, для вирішення тематичного завдання, дешифрування вибір ознак. Способи класифікації залежать від того, як виділяють і обмежують область значень яскравості класу. Найбільш раціональний спосіб класифікації повинен враховувати характер розподілу значень яскравості між класами і всередині кожного класу.

В процесі вивчення обґрунтування ефективних методів класифікації нами використовувались такі підходи.

Неконтрольовані класифікації (ISODATA і

K-Means), які представляють собою варіанти кластерного аналізу; застосовуються для детального аналізу характеристик яскравості багатозонального зображення та визначення кількості майбутніх класів контрольованої класифікації. Як правило, потребують тривалих експериментів з параметрами (рис. 3.10).

Неконтрольована класифікація може використовуватись при структурному дешифруванні, що інколи потребує виявлення тонких змін яскравості підстильної поверхні вздовж розломно-тріщинних зон (рис. 3.11).

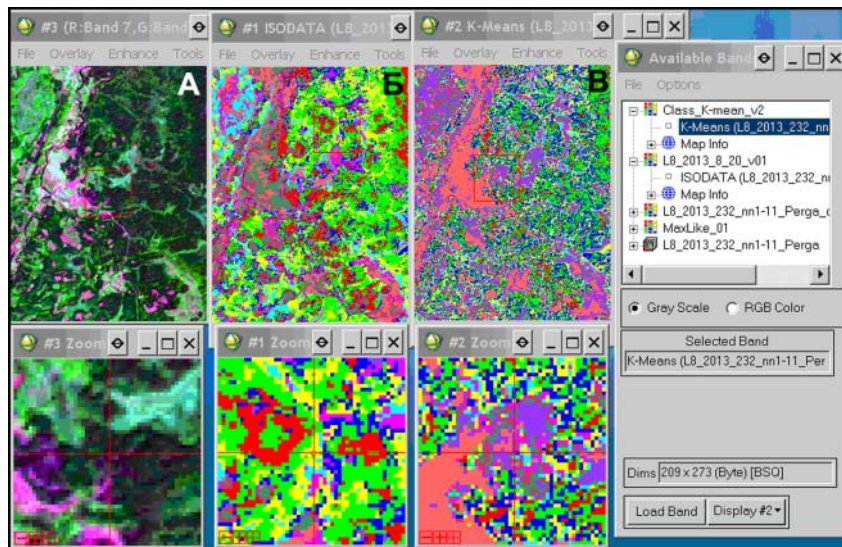


Рис. 3.10. Приклад неконтрольованої класифікації: А — вихідне багатоспектральне зображення (9 каналів — RGB композит 7, 5, 3 каналів); Б — за способом ISODATA — виділено 7 класів та В — за способом K-Means — виділено 10 класів

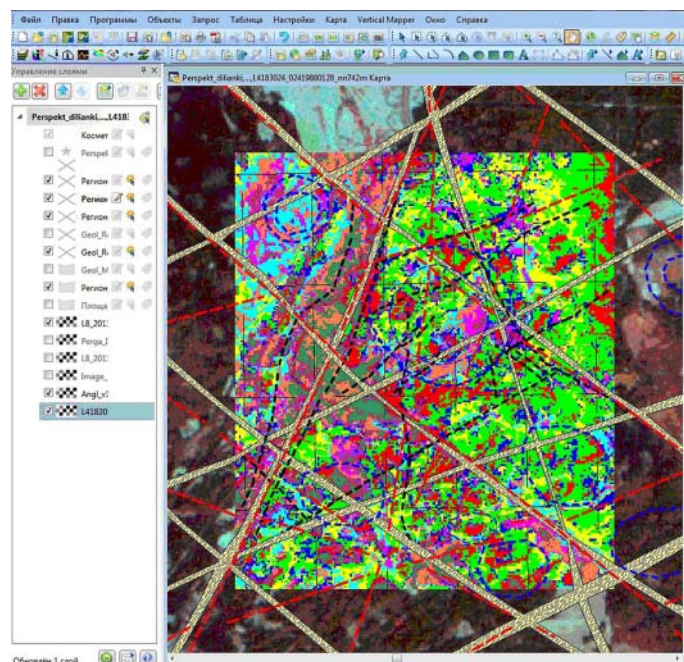


Рис. 3.11. Приклад структурного дешифрування розломно-тріщинних зон на основі аналізу даних неконтрольованої класифікації за способом ISODATA

Алгоритми контрольованої класифікації.

При аналізі можливостей контрольованої класифікації:

- спосіб паралелепіпедів (Parallelepiped);
- спосіб мінімальної відстані — метрика Евкліда (Minimum Distance Classification);
- спосіб “Відстань Махаланобіса” (Mahalanobis Distance Classification);
- спосіб максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood Classification);
- спосіб спектрального кута (Spectral Angle Mapper Classification);
- спосіб подвійного кодування (Binary encoding classification).

Для проведення попередньої контрольованої класифікації для кожного об’єкту класифікації були визначені “області інтересу” (ROI) та назначені певні кольори.

Класифікація проводилась послідовно, по різних спектральним зображенням. При класифікаціях застосовувались певні параметри, головними з яких було:

- Number of Classes — число класів, які були виділені на знімку стосовно задач досліджень;
- Maximum Iterations — максимальне число ітерацій;
- Threshold — поріг збіжності — кількість пікселів (у відсотках), які міняють приналежність до класу при переході до наступної ітерації;
- Maximum Stdev from mean — максимальне стандартне відхилення від середнього;
- Maximum distance error — максимальна помилка відстані.

Спосіб паралелепіпедів (алгоритм Parallelepiped). Досить добре виділяються водні та рослинні об’єкти, частково дороги. Але точність класифікації низька — 34.53%. Коефіцієнт каппа всього 0.2657.

Спосіб мінімальної відстані (алгоритм Minimum Distance Classification). Основні параметри, що задані при класифікації:

- Select Classes from Regions — список областей інтересу — 7;
- Maximum Stdev from mean — максимальне стандартне відхилення від середнього значення класу — 4;
- Maximum distance error — максимальна помилка відстані (у значеннях яскравості, DN) — 10.

Пікселі, відстань до яких буде більша, ніж ця величина, не будуть класифіковані.

Якщо задати другий і третій параметри одночасно, то використовуватиметься найменше значення з двох останніх. Результат значно кращий, ніж в попередньому методі — добре розкласифіковані типи зелених насаджень, розділені більш точноше водні об’єкти. Точність класифікації невелика — 61.60%. Коефіцієнт каппа низький: 0.5572.

Класифікація способом “Відстань Махаланобіса”

(алгоритм Mahalanobis Distance Classification) використовує статистику для кожного класу. Він подібний до класифікації способом максимальної правдоподібності, але швидший і передбачає, що коваріації всіх класів рівні. Всі пікселі класифіковані до найближчого класу, вибраного областю інтересу. Якщо визначити поріг відстані, то деякі пікселі можуть бути не класифікованими, якщо вони виходять за межі порогу.

Точність класифікації задовільна — 81.97%. коефіцієнт каппа високий — 0.781.

Спосіб максимальної правдоподібності (алгоритм Maximum Likelihood Classification). Це найбільш вживаний спосіб швидкої контрольованої класифікації, який дає високу ступінь точності. В нашому випадку вона складає 95.46% при коефіцієнті каппа 0.9442.

Спосіб спектрального кута (алгоритм Spectral Angle Mapper Classification). В даному випадку відношення пікселя до класу визначається за рахунок набутого максимального значення спектрального кута між середнім значенням класу і останніми значеннями пікселів в n -мірному просторі спектральних ознак (де n — число використовуваних каналів). Параметри, що задаються, для розрахунку по даному алгоритму наступні:

- кількість класів, що визначається за рахунок завантаження файлу областей інтересу або файлу у форматі EVF;
- Maximum Angle — максимальний кут (задається в радіанах).

Точність класифікації, у порівнянні з попереднім способом нижча — 78.51%. Коефіцієнт каппа також не оптимальний 0.7381.

Спосіб двійкового кодування (алгоритм Binary encoding classification). Параметри, що задаються для реалізації наступні:

- Select Classes from Regions — список областей інтересу;
- Minimum Encoding Threshold — мінімальний поріг кодування, який задається для розмежування класів. Для наших досліджень цей спосіб виявився непридатним. Точність класифікації незадовільна — 22.28%. Коефіцієнт каппа дуже низький — 0.1091.

До контрольованої класифікації відносяться ще два способи, а саме: “Нейронна мережа” (алгоритм Neural Net Classification) та спосіб опорних векторів (Support vector machines — SVM), оскільки для роботи в обох випадках потрібно задати еталонні області.

Для тематичного дешифрування більш перспективне використання *нейромережових технологій комплексного аналізу*. В першу чергу, такі технології відрізняє адаптивність до незначних змін умов зйомки в межах аналізованого зображення (наприклад, нерівномірний розподіл серпанку), а також можливість залучення до аналізу великого масиву різнорідних даних (наприклад, даних мультисезон-

ної зйомки), що дає стійкіший результат при екстраполяції зафіксованого експертного рішення при дешифруванні. Нейромережеві технології дозволяють виконати:

- попиксельну класифікацію багатозональних зображень на основі спектральних і інших попиксельних характеристик знімка;
- контекстуальну класифікацію (з використанням раніше побудованої попиксельної класифікації);
- класифікацію параметричних полів перетворення Хафа — для виявлення характерних поєднань прямих ліній в околицях кожної точки знімка і побудови класифікації на їх основі.

Спосіб класифікації “Нейронна мережа” (Neural Net Classification). У ПК ENVI використовується стандартний алгоритм зворотнього поширення. Як функція активації може використовуватися одна з сигмоїдальних функцій: раціональна сигмоїда або гіперболічний тангенс. Еталонними областями або областями, які прийняті для визначення класу, є області інтересу (Regions of Interest — ROI). Важливо, щоб області були максимально однорідні, інакше результат буде негативний. Після створення ROI запускалася нейронна класифікація, з наступними параметрами, що задаються:

- Select Classes from Regions (“виберіть класи з областей”) — список ROI, тобто список кількості класів, який необхідно створити в майбутньому, в даному випадку — 7;
- метод активації (Activation) — Logistic (раціональна сигмоїда) і Hyperbolic (гіперболічний тангенс); в даному випадку використовувався метод Logistic;
- Training Threshold Contribution — значення цього параметра може змінюватися від 0 до 1.0. Він визначає розмір внутрішньої ваги відносно рівня активації вузла. Цей параметр використовується, щоб пристосувати зміни до внутрішньої ваги вузла. Алгоритм в інтерактивному режимі регулює вагу між вузлами і довільним порогами вузлів, аби мінімізувати помилку між шаром виходу і бажаним результатом. Значення 0 не регулює внутрішню вагу вузлів. Регулюючи внутрішню вагу вузлів, можна добитися кращих результатів класифікації, але дуже велика вага може привести до сильних узагальнень і, як наслідок, до втрати інформації. У розрахунках використовувалося значення 0.90.
- Training Rate і Training Momentum — параметри, що визначають як швидко стабілізується нейронна мережа. Величина “Training Rate” визначає регулювання ваги. При високих значеннях нейронна мережа сходиться швидко, але можливо завчасно. При низьких значеннях буде узяті велике число повторень, що приведе до великих витрат часу. Небезпека використання великих значень “Training Rate” полягає в тому, що при моделю-

ванні мережа може вагатися, а не стабілізуватися. Параметр “Training Momentum” допомагає зменшити коливання між ітераціями і дозволяє при використанні високих значень “Training Rate” уникнути певної ризику незбіжності. При великих значеннях навчання проходить з великими кроками, чим при нижчих значеннях. У розрахунках для першого параметра використовувалося значення, рівне 0.20, а для другого — 0.90.

- Training RMS Exit Criteria — параметр, що відповідає за значення середньоквадратичної погрішності, яка визначає, коли повинне закінчитися навчання. Якщо значення середньоквадратичної погрішності, яке показується на графіці в процесі навчання, нижче заданого, навчання зупиниться, навіть якщо число ітерацій не було виконане, класифікація буде запущена. У розрахунках використано значення цього параметра — 0.10.
- Number of Hidden Layers — число необхідних прихованих рівнів. Для виконання лінійної класифікації значення дорівнює 0, тобто без прихованих рівнів. Різні області на вихідних даних мають бути лінійно відокремленими в багатовимірному просторі. Для виконання нелінійної класифікації встановлюється значення рівня 1 або більше. У розрахунках використовувалося значення, рівне 1.
- Number of Training Iterations — кількість ітерацій навчання. У роботі було прийнято рівним 1 000.
- Min Output Activation Threshold — мінімальний поріг. Якщо значення активації пікселя, що класифікується, менше, ніж це порогове значення, то піксель буде відмічений як некласифікований. У розрахунках — 0.

Тривалість процесу класифікації значно більша ніж у попередніх випадках і залежить не лише від введених параметрів, але і від розміру знімка, що обробляється, тому бажано, на попередньому етапі обробки, обмежити розмір космічного знімка мінімальною площею, що виходить за об'єкти досліджень. Точність класифікації дуже висока — 92.57% / Коефіцієнт каппа теж високий — 0.9082.

Спосіб класифікації “Метод опорних векторів” (Support vector machines — SVM). Група алгоритмів класифікації, заснованих на навчанні на еталонах, що використовують лінійне розділення об'єктів в просторі ознак за допомогою гіперплощини. Метод використовується для вирішення завдання бінарної класифікації.

Основною проблемою методу “Машини опорних векторів” є вибір оптимальної гіперплощини, яка дозволяє розділити класи з максимальною точністю. Для цього розділяюча гіперплощина повинна бути вибрана так, щоб відстань між найближчими точками, розташованими по різні сторони від неї, була б максимальною. Дана відстань називається зазором (*margin*), а самі точки — опорними векторами. Тоді розділяюча гіперплощина повинна бути вибрана так, щоб максимізувати зазор, що забезпечить впевненіше розділення класів.

Точність класифікації дуже висока — 95.18%. Коefіцієнт каппа теж високий — 0.9405.

Таким чином за проведеними дослідженнями серед розглянутих способів класифікації космічних даних, отриманих з КА Landsat для території Пержанського рудного поля оптимальними способами контрольованої класифікації стосовно виявлення ареалів розповсюдження гранітоїдних масивів нами вибрані спосіб класифікації “Машини опорних векторів” (Support vector machines — SVM) та спосіб максимальної правдоподібності (алгоритм Maximum Likelihood Classification). Зразки класифікацій за цими способами наведені на рис. 3.12.

Процес класифікації та посткласифікаційної обробки завершується формуванням вихідного растрового зображення. На наступному етапі необхідно провести автоматичну векторизацію — перетворення растрового зображення у векторні шари. Вихідні файли у форматі EVF експортувати у файли

ГІС MapInfo, або ArcGIS для подальшої корекції меж виділених класів та статистичної обробки класифікованих одиниць. Повний набір шарів складає основу картографічної моделі результатів класифікації.

При співставленні даних класифікацій за спектральними ознаками з геологічними побудовами, що спираються на великий масив даних буріння кореляційних зв'язків між ними практично не виявлено (рис.3.13). Пояснюється це, на наш погляд, дуже обмеженою площею виходів на денну поверхню гірських порід, залісненням і заболоченням території. Таким чином за спектральними критеріями геологічне картування рудних тіл за прямими ознаками виявилось не можливим.

Разом з тим, виявлені за спектральними ознаками ландшафтні об'єкти та їх елементи додали суттєвий приріст інформації для структурного дешифрування (рис. 3.14).

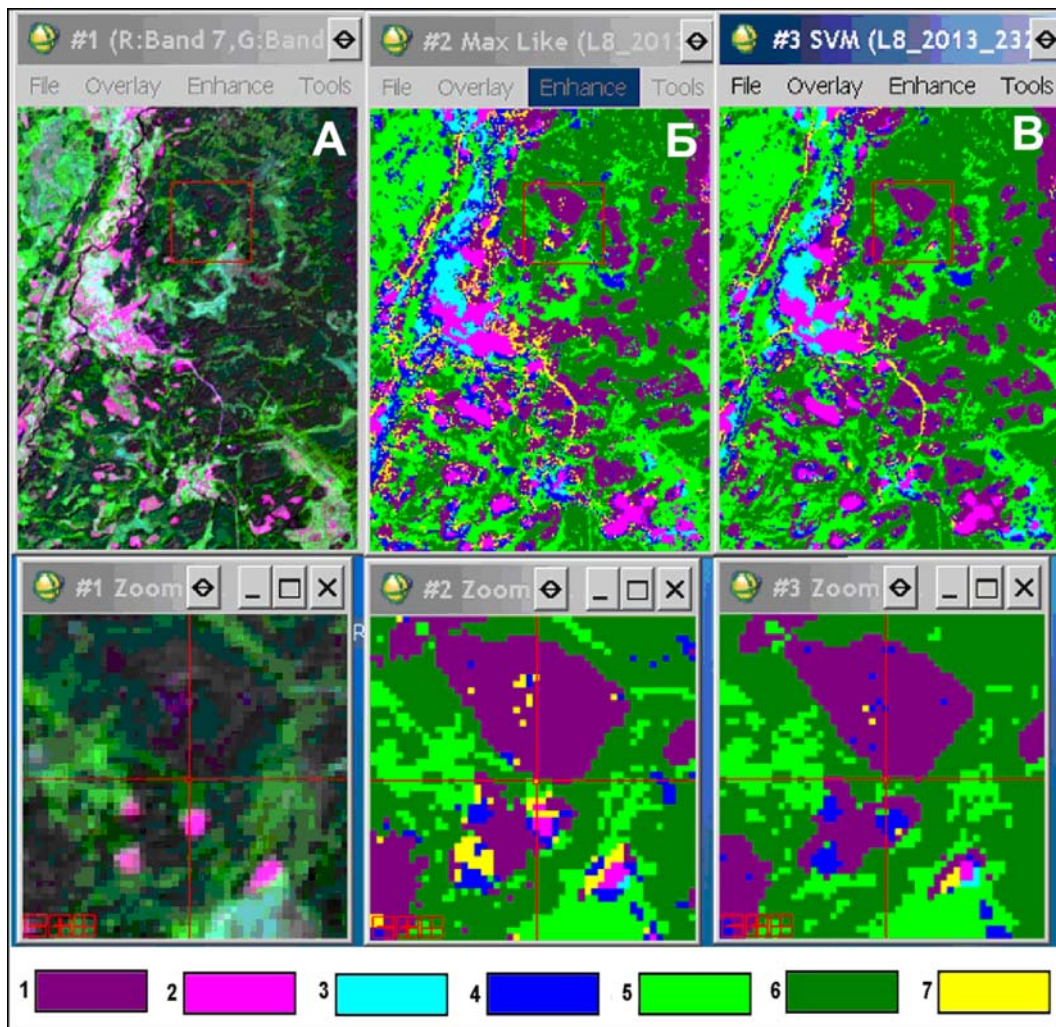


Рис. 3.12. Приклади контрольованої класифікації: А — вихідне багатоспектральне зображення (10 каналів — RGB композит 7,5,3 каналів) Б — за способом опорних векторів (Support vector machines — SVM) та В — за способом максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood Classification — MLK).

Класи, що умовно відповідають геологічним породам: 1 — сієнітам, 2 — пержанським гранітам, 3 — алювіальним терасовим відкладам; 4 — клас, що відповідає гідромережі та перезволоженим ділянкам; класи, що відповідають рослинності: 5 — болотно-листяної, 6 — хвойних порід; 6 — дороги та відкритий ґрунт

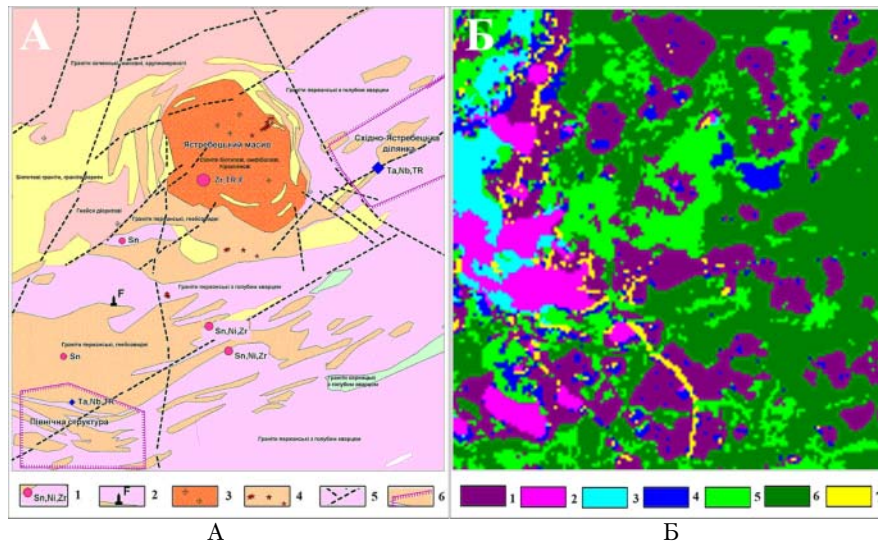


Рис. 3.13. Співставлення геологічних даних (А) з даними попиксельних спектральних класифікацій (Б)
 Умовні позначення до А: 1 — рудні родовища; 2 — родовище флюориту; 3 — свердловини; 4 — точки польових спектрометричних досліджень; 5 — ймовірні розломи; 6 — межі родовищ, що прогноуються.
 Умовні позначення до Б: Класи, що умовно відповідають геологічним породам: 1 — сієнітам, 2 — пержанським гранітам, 3 — алювіальним терасовим відкладам; 4 — клас, що відповідає гідромережі та перезволоженим ділянкам; класи, що відповідають рослинності: 5 — болотно-листяної, 6 — хвойних порід; 6 — дороги та відкритий ґрунт

В останні роки набуває широкого розповсюдження об'єктно-орієнтована класифікація зображень, яка враховує не тільки спектрометричні властивості, а і морфометричні показники зображень (текстура поверхні, форма, розміри тощо). Такий підхід дозволяє отримати позитивні результати у відношенні більш певнішого виявлення структурних факторів (поруч із спектральними характеристиками

зображення) ймовірного виявлення ділянок (площ) рудоносних порід (рис. 3.15).

За результатами структурного дешифрування і спектрометричних досліджень супутникових даних Ястребецького родовища рідкісноземельно-цирконієвих руд встановлено, що його геологічна будова може бути дешифрована як за прямими дешифрувальними ознаками та і опосередковано,

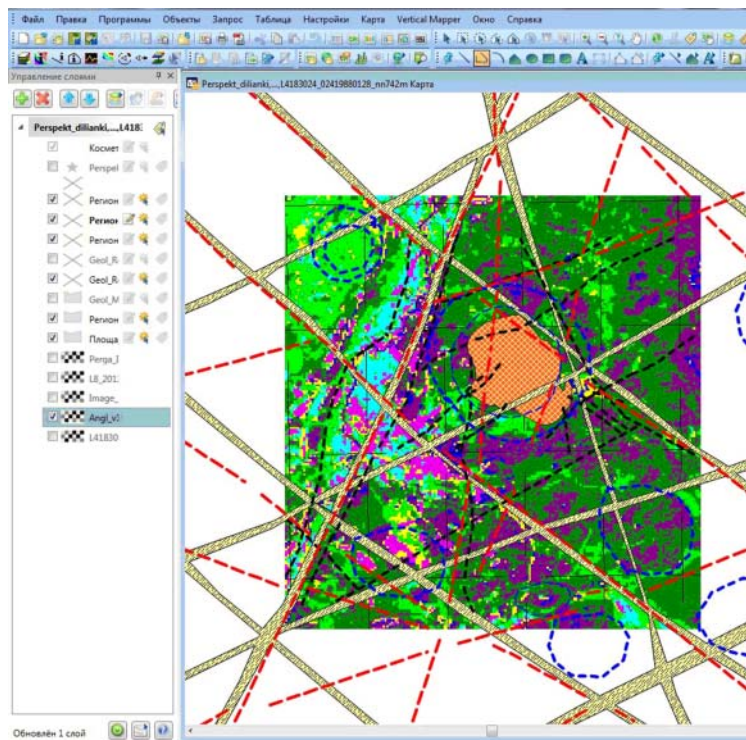


Рис. 3.14. Приклад структурного дешифрування на основі аналізу даних контрольованої класифікації за методом опорних векторів

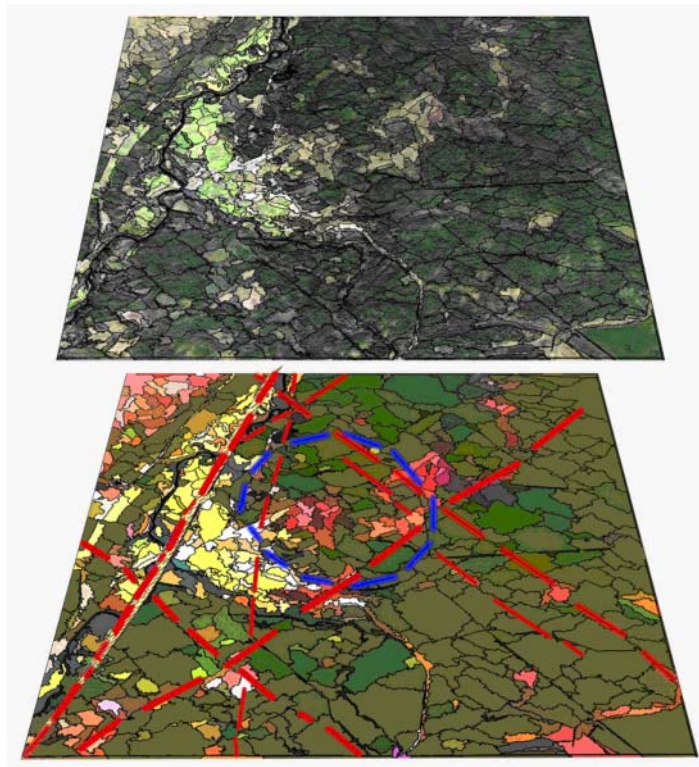


Рис. 3.15. Приклад об'єктно орієнтована класифікації території Пержанського рудного поля (А, Б) та основні його структурні елементи (зони лінеаментів і кільцева структура на Б)

через особливості окремих елементів ландшафту (рослинний покрив, особливості рельєфу, конфігурацію гідромережі, поширення ділянок заболочення та ін.). При цьому, достовірність виявлення породних комплексів залишається не високою, а отже і виявлення ореолів зруденіння за спектральними ознаками на матеріалах космічних зйомок залишається проблематичним. За спектральними характеристиками, породи з якими пов'язані пошукові об'єкти дуже відрізняються у природному стані від “геологічно чистих” порід-аналогів. При застосуванні гіперспектральних космічних даних EO-1 (HYPERION) існує теоретична можливість вирішення цієї проблеми, але, на жаль, на цю територію ця зйомка відсутня.

Підсумок

В умовах Українського Полісся головним пошуковим критерієм родовищ рудної сировини за матеріалами ДЗЗ залишається структурний. Застосування дистанційних спектральних пошукових критеріїв, які себе зарекомендували у геологічно “відкритих” областях світу, в умовах північної України, на разі, проблематично.

Дистанційна частина пошуків родовищ рудної сировини закінчується складанням прогнозних карт розломно-блокової тектоніки з виявленими структурами центрального типу та прогнозними ділянками можливого зруденіння.

Технологічно методика пошуку рудної сировини

на основі інтегрування дистанційних і наземних спектрометричних даних передбачає (див. рис. 3.1) поетапне використання матеріалів багатозональних аерокосмічних зйомок, даних наземної спектрометрії, геолого-геофізичних, геохімічних і мінералогічних даних, що застосовуються в сучасних мінералогічних дослідженнях:

1-й етап “Формування бази даних”. Основними роботами етапу є:

- Підбір матеріалів багатоспектральних аерокосмічних зйомок в т. ч. радарних, створення цифрових моделей рельєфу, збір існуючих матеріалів топографічних зйомок.
- Проведення радіометричної, геометричних корекцій дистанційних зображень
- Збір, систематизація, обробка (векторизація) геолого-геофізичних геохімічних, мінералогічних, ландшафтно-геоморфологічних даних (виділення відповідних таксонів)

2-й етап “Дешифрування”. Даний етап за об'ємом робіт є найбільш тривалим і передбачає наступні основні види робіт:

- Структурно-геологічне дешифрування багатоспектральних матеріалів дистанційного зондування (інтерактивний режим).
- Обробка даних дешифрування (виявлення, класифікація диз'юнктивних структур, лінійних зон підвищеної тріщинуватості гірських порід (лінеаментів), виявлення, класифікація вузлів перетинів розломів, лінеаментів, виявлення, класифікація

кільцевих структур, виявлення структурно-речових комплексів, отримання інших (переважно якісних) характеристик результатів дешифрування дистанційних багатоспектральних зображень.

- Польові геолого-ландшафтні, геоморфологічні дослідження.
- Польові спектрометричні дослідження.
- ПС операції з інтегрування результатів дешифрування матеріалів багатозональних аерокосмічних знімачів, геолого-геофізичних геохімічних, мінералогічних даних, матеріалів спектрометричних досліджень.
- Комп'ютерна обробка дистанційних зображень (кольорові фільтрації, класифікації і т. д.), отримання кількісних характеристик результатів структурно-геологічного дешифрування.
- Тематична обробка геолого-мінералогічних даних, ландшафтно-геоморфологічних досліджень, оцінки геохімічних матеріалів.
- Дослідження кореляцій тематичних геолого-мінералогічних даних з наземними спектрометричними дослідженнями.
- Оцінка інформативності пошукових ознак, попередня геолого-мінералогічна інтерпретація отриманих результатів тематичної обробки (робоча гіпотеза).
- Візуалізація сприятливих пошукових ознак.
- Валідація даних.

3-й етап. “Металогенічний аналіз”. Основним завданням етапу є:

- Якісне та кількісне оброблення результатів аналізу дистанційних та традиційних геолого-ланд-

шафтних даних з метою виявлення ознак рудної сировини.

- Виявлення можливих рудоконтролюючих структур і рудних таксонів за пошуковими ознаками виявленими в процесі дешифрування. Отримання нової додаткової інформації.
- Розробка проміжної (уточнення попередньої) комплексної моделі пошукового мінералогічного об'єкту.

4-й етап. “Прогнозні рекомендації”. Передбачає:

- ПС аналіз мінералогічних даних і моделі пошукового мінералогічного об'єкту (ревізія відомих і виявлення нових рудоконтролюючих структур і їх характеристик за комплексом ознак) на основі комп'ютерного оброблення та дешифрування аерокосмічних зображень і польової спектрометрії.
- Формування уточненої прогнозно-пошукової (структурно-мінералогічної) моделі площі розповсюдження рудної сировини та оцінка нових прогнозних територій
 - Надання рекомендацій з проведення подальших пошуково-розвідувальних робіт.

Специфікою застосування результатів дистанційних досліджень є акцент на виявлення структурного контролю зруденіння шляхом аналізу розміщення відомих рудних об'єктів і створення або вдосконалення нової комплексної прогнозно-пошукової моделі об'єкта, і відповідно, оцінки нових перспективних територій.

3.3. Інтегрування дистанційних і геолого-геофізичних даних під час пошуково-розвідувальних робіт на поліметалеві руди

Розвиток методів і алгоритмів обробки різномірних за своєю фізичною природою геопросторових дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі інтеграції геоінформаційних технологій та методик перетворення матеріалів ДЗЗ дозволив сформувати нові напрями геологічних досліджень для вирішення актуальних у цій галузі знань проблем [46, 47]. З метою оцінки енергетичного та сировинного потенціалу окремих регіонів України наявні і перспективні на родовища розсипних і корінних поліметалевих руд площі в цьому аспекті потребують комплексного геоінформаційного аналізу.

Запропонований у праці [46] підхід інтегрально-го оброблення дистанційних аерокосмічних і геолого-геофізичних даних є інструментом підвищення геологорозвідувальних робіт на поліметалеві руди з метою удосконалення системи управління гірничодобувної галузі. Він дозволяє побудувати фізико-геологічну модель родовища, а саме: виявити площі утворення, що можуть відповідати геологічним об'єктам, отримати більш комплексну

інформацію про геологічне середовище в їх межах, про перспективність та стосовно оцінки можливих запасів корисних копалин на тих чи інших площах. Це реалізується шляхом багатовимірного геопросторового моделювання та візуалізації параметрів схожості особливостей геологічного середовища ділянки досліджень з особливостями тестових (еталонних) геологічних об'єктів з апіорі відомими параметрами, що розташовані в її межах. У результаті передбачається отримати прогнозну класифікаційну картосхему перспективності на наявність цих об'єктів (наприклад, поліметалевих рудопоявів) на території, що досліджується, за комплексом дистанційних та геолого-геофізичних матеріалів.

Підхід

Для забезпечення змістовності інтегральної інтерпретації комплексу геолого-геофізичних даних потрібна параметризація геологічного середовища — побудова модельного уявлення. Побудова модельного уявлення геологічного се-

редовища передбачає попереднє формулювання переліку параметрів, які підлягають визначенню, та геологічне обґрунтування можливих діапазонів їх значень. Кожному конкретному набору значень параметрів відповідає геологічна модель, якою визначається набір і планова конфігурація різноманітних геофізичних полів [48].

Як параметри для створення геологічної моделі території нами, насамперед, пропонується використовувати результати гравіметричних (карти локальних аномалій поля сил тяжіння, редукція Буге) та магнітометричних (карти локальних аномалій

магнітного поля) досліджень (рис 3.16, 3.17). Крім того, необхідно залучати матеріали рельєфу місцевості у цифровому форматі за даними супутників типу Terra або Shuttle (рис 3.18) та довготривалі осереднення температури земної поверхні за результатами оброблення інфрачервоних зображень КА Landsat (рис 3.19). Усі ці дані потрібно подавати у вигляді растрових карт.

Дані стосовно рельєфу денної поверхні необхідно враховувати з огляду на вірогідні феноменологічні моделі взаємовідношення глибоко залягаючих структурних форм (особливо тих, які контрастно проявляються за структурно-речовинними

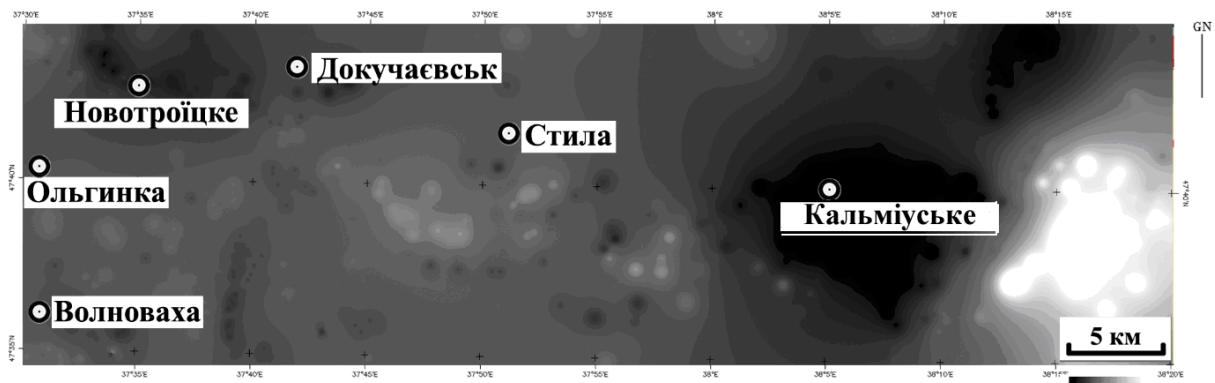


Рис. 3.16. Новотроїцька площа. Карта локальних гравітаційних аномалій Буге ($mGal$), растрове представлення

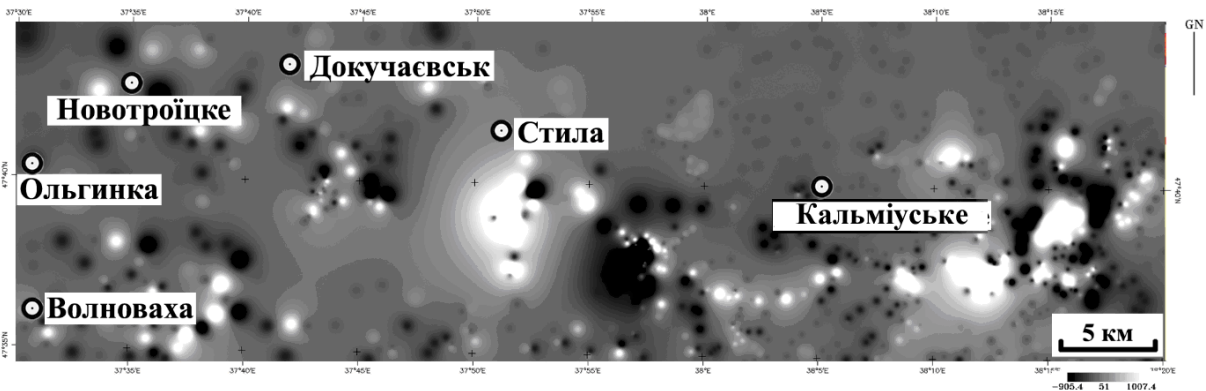


Рис. 3.17. Новотроїцька площа. Карта локальних магнітного поля (nT), растрове представлення

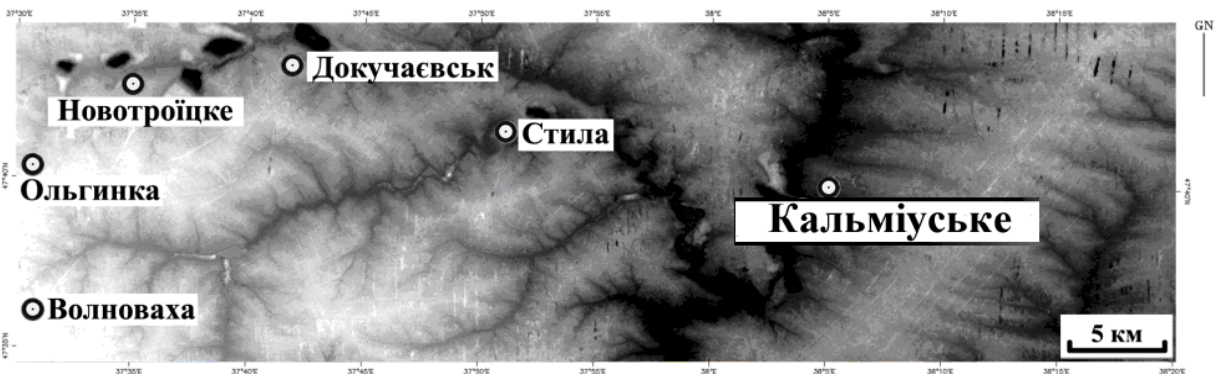


Рис. 3.18. Новотроїцька площа. Карта цифрового рельєфу (m) за ASTER-GDEM-даними з супутника Terra