


УДК 553.519.2

 <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.10-15>

О. І. БІЛОУС, канд. геол.-мін. наук, голов. геолог (ТОВ "Феррекспо Сервіс"), a.belous@ferrexpo.com, <https://orcid.org/0009-0000-1201-6008>,

В. О. ПАРФЕНЮК, голов. геолог (ТОВ "Гео-кратон"), vladymyr.parfenyuk@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-2092-8562>,

В. П. БЕЗВИННИЙ, канд. геол. наук, голов. геолог (ДП "Українська геологічна компанія"), volodymyr.bezvyunnyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-1628-2786>,

Б. І. СЛОБОДЯН, асп. (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України), sbiv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0006-6720-1220>

O. BILOUS, Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Chief geologist (Ferrexpo Services Ltd.), a.belous@ferrexpo.com, <https://orcid.org/0009-0000-1201-6008>,

V. PARFENIUK, Chief geologist (Geo-craton Ltd.), vladymyr.parfenyuk@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-2092-8562>

V. BEZVYNNYI, Candidate of Geological Sciences, Chief geologist (SE Ukrainian Geological Company), volodymyr.bezvyunnyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-1628-2786>,

B. SLOBODIAN, PhD student (M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine), sbiv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0006-6720-1220>

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ РОДОВИЩ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ (на прикладі Полохівського родовища літію)

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CRITICAL MINERAL COMMODITIES (on example of Polokhivske lithium deposit)

Характерною ознакою багатьох родовищ критичної мінеральної сировини є просторові хаотичні коливання вмісту корисної копалини (логнормальний розподіл, відсутність чітких геологічних границь тощо), що суттєво обмежує використання традиційних методів геолого-економічної оцінки, особливо геостатистики. Можливим вирішенням може бути застосування різних фрактальних методів, які засновані на принципі багаторазової подільності геологічного об'єкта до розміру його елементарної частинки, що називається фракталом. У цій статті розглядається кількісно-розмірний фрактальний метод з метою відокремлення потенційно рудоносних зон та мінералізованих геохімічних аномалій літію від фонових значень на прикладі Полохівського родовища метасоматично змінених пегматитів. Доведено потенціал вказаного методу для обґрунтування напряму геологорозвідувальних робіт та проведення геолого-економічної оцінки.

Ключові слова: Полохівське родовище, кількісно-розмірний фрактальний аналіз, геолого-економічна оцінка.

The characteristic feature of many deposits of critical raw materials is spatial chaotic fluctuations of grades (strongly skewed and lognormal distributions, soft geological boundaries etc.), which essentially limit the use of traditional economic evaluation methods and, especially, geostatistics. A possible solution may be application of various fractal methods based on the principle of multiple divisibility of geological object to the size of its elementary part, called fractal. Today fractal methods are widely used in life sciences, physics, mathematics, and chemistry, and are increasingly becoming used in biology and Earth sciences. For example, geological and mining for oil and gas apply fractal methods as a standard tool. A review of the literature in these areas shows that there are many issues in the field of critical raw materials that can be solved using fractal methods. Polokhivske deposit of LCT-type pegmatites with monomineralic fine-grained petalite ore was chosen for the case study.

Pegmatites of Polokhivske deposit lack zoning and are characterised by uneven distribution of multi-grained mineral associations. Composition of pegmatites depends on the quantitative ratio of potassium feldspar, albite, and petalite. The difficulty to reveal any ore control features is explained by the proximity of the silica saturation and alkalinity of the hosting granites and fluids that transformed them. The moving average depth-grade method was used to solve specified issue. The clear trend of rhythmically increasing lithium content with depth was uncovered. This indicates that the deposit can be modelled as separate mineralised zones, each of which contains areas enriched with lithium and the location of such enriched areas must obey a certain regularity.

This number-size fractal method was applied in order to separate potentially ore-bearing zones and mineralised geochemical anomalies of lithium from its background values. It has been proved the validity of this method to justify direction of exploration, economic evaluation, and mine planning. The resulting number-size model appeared powerful that revealed three mineralised zones within hosting granites: weakly mineralised metasomatically altered granites ($0.08\% \leq \text{Li}_2\text{O} < 0.72\%$), mineralized metasomatites ($0.72\% \leq \text{Li}_2\text{O} < 1.50\%$), and high-grade mineralised pegmatites ($\text{Li}_2\text{O} \geq 1.50\%$). The distinguished thresholds have appeared to be in sequence and multiple of the fractal dimension. From resulted model a spatial anisotropy of lithium grades was revealed: mineralised metasomatites spatially gravitate to the foot wall of weakly mineralised granites, and high-grade pegmatitic zones gravitate to the foot wall of mineralised metasomatites. Distribution of mineralised metasomatites and pegmatites shift northeasterly from the central axis of the Polokhivsky granitic massif.

Keywords: Polokhivske deposit, number-size fractal analysis, economic evaluation.

Вступ

Типовою ознакою багатьох родовищ критичної мінеральної сировини, куди Європейські країни відносять літій [12], є просторові хаотичні коливання вмісту, логнормальний розподіл величин концентрацій корисних компонентів і відсутність чітких геологічних границь [18]. Зокрема, розмиті ("м'які")

геологічні границі характерні для рідкіснометалевих гранітів, деяких пегматитів і метасоматитів, міднопорфірових родовищ, родовищ у корі вивітрювання і зон окислення, деяких інших генетичних типів. Полохівське родовище літієво-літійових метасоматично змінених пегматитів вибрано в якості полігону досліджень як таке, що характеризується і логнормальним розподілом величин концентрацій літію, і розмитими границями породних різновидів і рудних тіл.

Кількісна оцінка будь-якого родовища, крім вмісту та тоннажу корисної копалини, потребує визначення просторової позиції мінералізації та її внутрішньої цілісності. Але при логнормальному розподілі та розпливчастих (багатоваріантних) ознаках контролю мінералізації застосування традиційних та геостатистичних лінійних методів оцінки ускладнюється тим, що визначені бортові вмісти корисної копалини не обов'язково співпадають із границями геологічних доменів і потребують подальшої деталізації останніх на більш дрібні елементи із масовим залученням точних діагностичних наукоємних методів, таких як електронно-зондовий рентгеноспектральний мікроаналіз, рентгенодифрактометрія, растрова електронна мікроскопія у комбінації з методом індуктивної зв'язаної плазми, час-пролітна мас-спектрометрія та термодинамічні розрахунки. При геологічній розвідці, особливо на її початковій стадії, такий підхід виправданій, якщо поєднується й узгоджується із геологічними параметрами, наприклад, зональністю. Коли такі параметри невідомі, для запобігання суттєвого подорожчання і розтягування процесу геолого-економічної оцінки у часі варто користуватися математичними опосередкованими методами.

Для вирішення вказаної проблеми було запропоновано декілька нових нелінійних методів, які ґрунтуються на теоріях самоорганізації мінеральних систем [13], непарної логіки (*fuzzy logic*) [9] або фрактального розміру [16, 19]. В даній статті розглядаються результати застосування найбільш простого кількісно-розмірного фрактального аналізу [8], який, на думку авторів, суттєво вдосконалює наше розуміння щодо визначення меж рудних тіл у мінералізованому середовищі з неясними факторами рудоконтролю.

Геолого-генетична позиція Полохівського родовища

Полохівське родовище просторово розташоване у західній частині Інгульського мегаблоку Українського щита, в екзоконтактовій зоні Корсунь-Новомиргородського габро-анортозит-рапаківігранітного плутону [4, 7]. Літєве зруденіння локалізоване у кварц-польовошпат-петалітових (зі сподуменом) метасоматично заміщених пегматитах, що розміщуються у верхній частині пералюмінієвих і лейкократових гранітів Полохівського масиву кіровоградського комплексу, який по тектонічному порушенню Звенигород-

сько-Ганнівської розломної зони контактує з породами плутону. Породи Полохівського масиву, як і пегматити, які вони вміщують, зазнали метасоматичних змін і ділянками перетворилися на аполейкограніти мусковіт-біотитові з турмаліном, кордієритом, силіманітом, гранатом.

Згідно з чинною Кореляційною хроностратиграфічною схемою ранньодокембрійських утворень Українського щита (2003 р.), верхня вікова межа становлення плутону сягає 1750 млн років, а вік гранітів кіровоградського комплексу – близько 2000 млн років.

Вірогідно, саме процеси перетворення речовини, зв'язані зі становленням плутону, активізували міграцію рудних елементів, призвели до перерозподілу їхнього балансу і локалізації в сприятливих умовах. Глибинний характер рапаківігранітної магми і підйом її в напівтвердому стані у вигляді блок-інтрузії зумовили і глибинний характер флюїдів, міграція і розвантаження яких могли відбуватися тільки через тектонічні зони. Високі РТ-параметри рідкого CO₂ у флюїдних включеннях у сподумен-петалітових метасоматично змінених пегматитах (температура 1180–1240 °С, тиск 4,7–8,8 кбар) пов'язані з флюїдними потоками, генерація яких, ймовірно, відбувалася внаслідок впровадження мантійного діапіру [2].

Слабкий прояв метасоматичної і геохімічної зональності, складність простеження контролю рудних тіл ділянками метасоматичних змін порід масиву, за винятком накладених зон грейзенізації і внутрішніх зон тріщинуватості, зумовлені близькістю за насиченістю кремнеземом і лугами гранітів масиву і флюїдів, що їх перетворювали. Ступінь прояву метасоматичних змін і форма рудних тіл залежать від внутрішньої будови масиву, а саме перемержування аплітових і більш зернистих різновидів гранітів.

У відкритих публікаціях зроблено припущення, що родовище відноситься до LCT-типу (літій–цезій–тантал) рідкісно-металевих пегматитів з мономінеральною дрібнозернистою петалітовою рудою [1, 5]. Питанням генезису, геолого-структурних умов локалізації, мінералогії і геохімії полохівських пегматитів присвячені праці, деякі з яких цитуються в цьому дослідженні [1–7]. Результати вказаних робіт об'єднані в таблиці 1. Додатково варто зазначити, що за даними аналізу включень в

Таблиця 1. Зведений перелік гірничо-геологічних ознак Полохівського родовища

Ознака	Стислий опис
Геотектонічна позиція	Інгульський мегаблок
Регіональна рудовмісна структура	Хмельська синкліналь північно-західного до субмеридіонального простягання в південно-західному контакті Корсунь-Новомиргородського плутону
Стратиграфічна належність	Інгулецька серія, роцахівська світа
Вік	Палеопротерозой
Вмісні породи	Біотитові, кордієрит-біотитові гнейси
Материнські інтрузії	Полохівський гранітний масив
Металогенічна позиція	Звенигородсько-Ганнівська структурно-металогенічна зона; Шполянсько-Ташлицький рідкіснометалевий рудний район (східна частина)
Рудоносний комплекс	Лейкократові апліт-пегматоїдні біотитові двопольовошпатові граніти
Структура родовища, умови залягання, розмір	Серія кулісоподібних пегматитових тіл північно-західного простягання з тяжінням до крайових частин гранітного масиву. Загальне падіння на південний захід під кутами від 50–60° до 60–80°
Кількість і параметри рудних тіл	Три рудних тіла неправильної форми довжиною від 200 до 550 м і потужністю від 60 до 130 м
Форма рудних тіл	Неправильна по типу “заміщення”, менше – прожилкова в зонах катаклазу
Структурний контроль рудних тіл	Відсутній
Рудний мінерал	Петаліт
Другорядні літєві мінерали	Сподумен, трифіліт, амблігоніт, інші
Типоморфні жильні мінеральні асоціації	Кварц-альбіт-калінатровий польовий шпат, кварц-альбіт-ортоклаз
Тип зростає головного мінералу	Реакційний: відщеплення петалітом апліт-пегматоїдних гранітів
Анізотропія кристалів	Переважаю відсутня (перша генерація)
Насиченість розплаву водою	Ненасичені – дефіцит води у флюїдних включеннях у всіх мінералах до 20 %
Умови утворення	Повільне охолодження літій-силікат-кремнеземного розплаву як функції температури та тиску

мінералах первинний розплав був збіднений на воду і пересичений алюмінієм у порівнянні з таким гранітів [5], тобто більш в'язким і менш мобільним. Типовою є таблитчаста форма мінералів, а характер зростків свідчить про когенетичність петаліту і сподумену [6]. Все викладене вказує на урівноважену, але дещо повільнішу кристалізацію зі зміщенням РТ-умов переважно в область утворення петаліту [14, 15]. Таким чином, за наведеними матеріалами Полохівське родовище повністю узгоджується із експериментально доведеною моделлю глобальної вертикальної зональності рідкіснометалевих пегматитів (рис. 1). Ця модель ґрунтується на класифікації П. Черни [10]; її основною перевагою є те, що вона враховує плутонічні деривати в якості джерела магматичної активності.

Відповідно до теорії самоорганізації мінеральних систем, вихідним положенням локального прогнозу є тезис: якщо будь-які закономірності чітко встановлюються в глобальному і регіональному вимірах, то їх можна розшифрувати на локальному і мікрорівнях [17]. Глобальний рівень в розумінні авторів – це відмічена вертикальна зональність LCT-типу пегматитів, яка встановлена на всіх континентах, а регіональний рівень – це розподіл і зональність пегматитових пучків у межах родовища. На локальному рівні зазвичай визначається внутрішня будова рудних покладів, а на мікрорівні – геометрія породоутворюючих мінералів у шліфах. Тобто, елементи вертикальної глобальної зональності мають повторитися як у межах самого Полохівського родовища, так і в окремих рудних тілах, про що мова йде далі.

Обґрунтування фрактального методу оцінки

При проведенні геологорозвідувальних робіт встановлено, що характерними рисами пегматитів Полохівського родовища є відсутність зональності та нерівномірний розподіл різнозернистих мінеральних асоціацій, а склад пегматитів залежить від кількісного співвідношення калієвого польового шпату, альбіту і петаліту [3, 8]. За мінеральним і хімічним складом вони подібні лейкоплагіогранітам або лейкогранітам [3]. Все залежить від кількості петаліту, і тому макроскопічно відрізнити слабо мінералізовані зони від гранітів, що їх вміщують, вдається тільки за даними хімічного аналізу вмісту літію. Пегматитові структури і текстури порід не виявлені. Але при цьому в шліфах відмічається наявність сподумену, що утворюється за рахунок петаліту, в зонах, як вважається [3], інтенсивної тектонічної напруги, хоча значних тектонічних структур у межах родовища не виявлено.

За таких геологічних умов пошук лінійної залежності вмісту літію від будь-якого іншого параметра ні до чого не

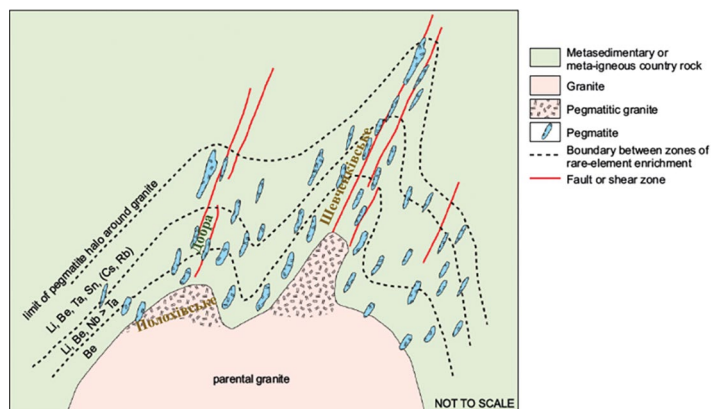


Рис. 1. Схема регіональної вертикальної зональності рідкіснометалевих пегматитів України, за [15]

приводить, і дослідники зазвичай обмежуються констатацією, що кореляція мала або взагалі відсутня і користуються відносними характеристиками (більше-менше, ближче-далі, приблизно і т. п.). Бортовий вміст для оконтурення визначається довільно або розраховується з використанням опосередкованих параметрів, у тому числі економічних, при зміні яких бортовий вміст теж змінюється. В математиці такі емпірично визначені числа називаються нечіткими, або крихкими. Але геологічна інтерпретація в якості вихідних даних потребує математично обґрунтованого бортового вмісту, що являє собою дійсне (природне) число, яке залежить тільки від геологічних обставин локалізації.

Автори розглядають Полохівське родовище в якості багатоконпонентного, ґрунтуючись на тому, що в геохімічному плані воно являє собою похідну від розподілу виключно трьох лужних металів – калію, натрію і літію. Рубідій і цезій, хоча і присутні, але своїми мінералами не представлені. Утворення калієвого польового шпату, альбіту і петаліту є результатом складної взаємодії фізичних і хімічних процесів, які зумовлені геологічним середовищем, у якому вони відбуваються [15].

Тому вказану проблему пошуку факторів рудоконтролю (анізотропії) можна вирішити із залученням методу змінного (ковзючого) середнього показника. Метод полягає спочатку в побудові гістограм для абсолютних відміток проб. Потім у межах кожного прямокутника гістограм розраховується середній вміст, у даному випадку літію та заліза. Результуючий графік залежності вмісту цих показників від глибини демонструє рис. 2.

З наведеного графіка очевидними є два важливих висновки. По-перше, встановлюються чіткі тенденції збільшення вмісту літію з глибиною з одночасним зменшенням вмісту заліза. Подібна тенденція зменшення концентрації з глибиною спостерігається для калію, але є менш виразною. Очевидних закономірностей у розповсюдженні деяких інших компонентів, наприклад Na, Ta, Nb, Rb, Cs, поки що не виявлено.

По-друге, зміна вмістів літію та заліза з глибиною є ритмічною. Це свідчить про те, що родовище можна представити у вигляді окремих мінералізованих зон, кожна з яких вміщує ділянки, збагачені літієм. В свою чергу, збагачені ділянки містять багаті руди. При цьому розташування таких збагачених ділянок і багатих руд у просторі родовища має підпорядковуватися певній закономірності.

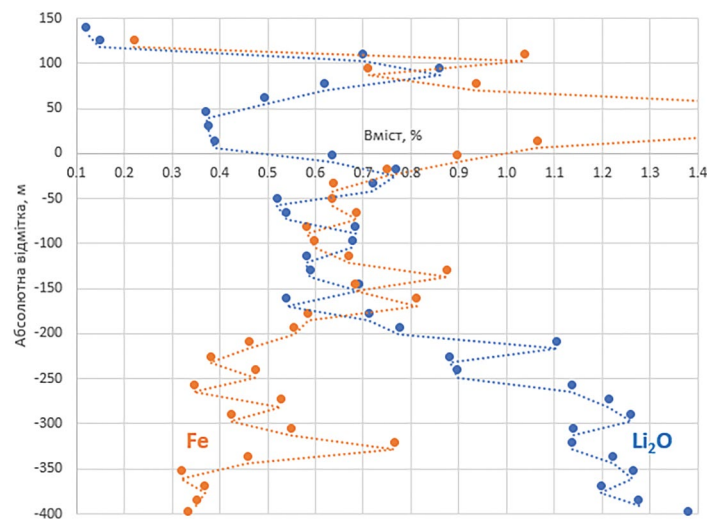


Рис. 2. Залежність середнього вмісту оксиду літію та заліза від глибини

З глибиною також, хоча і у невеликій кількості (1–4 %), відмічається збільшення в руді вмісту сподумену. В шліфах описана своєрідна структура петаліту і сподумену (Степанюк та ін., 2020, неопубліковані дані), коли зерна петаліту погасають по всій площі шліфа, а рідкісні включення сподумену погасають одночасно тільки в межах одного зерна петаліту. Автори даної статті вважають, що такий просторовий розподіл і форма петаліту і сподумену не є випадковою, а відображає збільшення інтенсивності анізотропії розподілу вмісту оксиду літію з глибиною, хоча цей тезис потребує обґрунтування.

Дане спостереження є важливим не тільки з точки зору прогнозування якості майбутнього петалітового концентрату та гірничого планування, але й для постановки геологорозвідувальних робіт і нарощування запасів. Полохівське родовище знаходиться на початковій стадії геологічного вивчення, і нижня границя зруденіння в даний час залишається не встановленою.

Все сказане підтверджується прямими спостереженнями в керні свердловин. Деякі дослідники прямо вказують на розповсюдження чотирьох різновидів літєвовмісних порід: безрудних гранітів, слабо мінералізованих метасоматично змінених гранітів, мінералізованих метасоматитів та інтенсивно мінералізованих пегматитів [3], але не наводять статистичні пороги, за якими варто відрізнити вказані різновиди. Тому актуальність завдання, поставленого авторами цієї статті, очевидна.

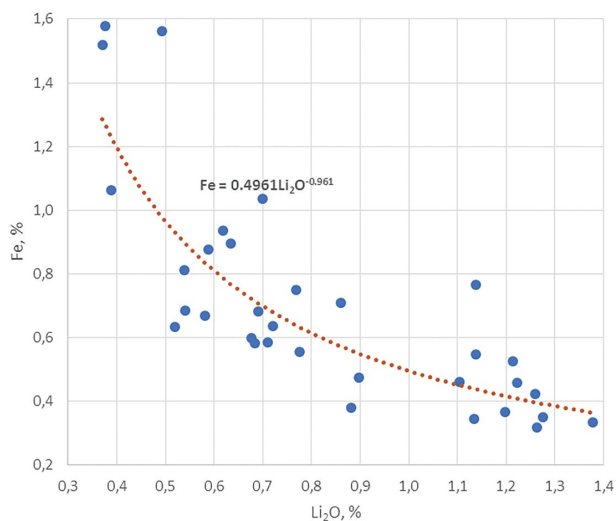


Рис. 3. Ступенева залежність вмісту заліза від вмісту оксиду літію

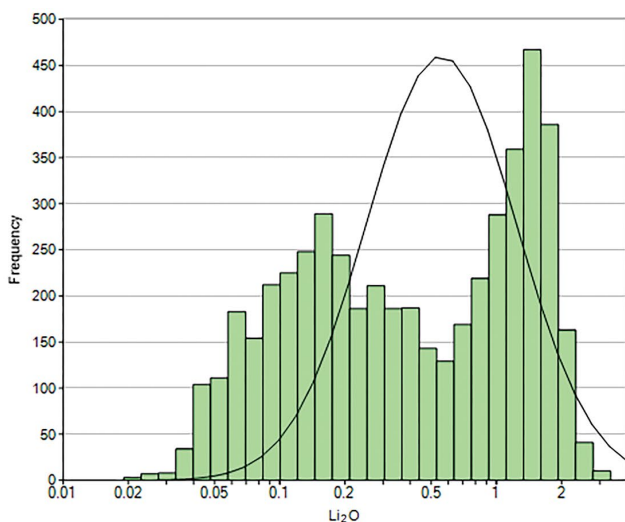


Рис. 4. Логнормальна гістограма та графік розподілу імовірностей вмісту оксиду літію

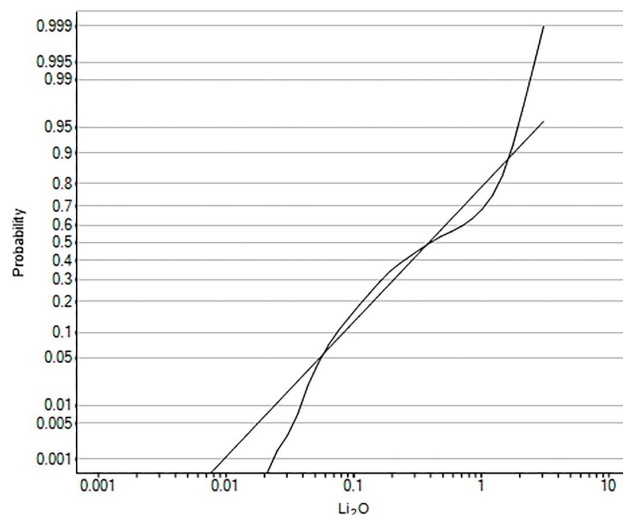
На відміну від лінійних методів оцінки (полігональних, просторових, геостатистичних та ін.), фрактальна геометрія розглядає взаємозв'язок (подібність) різних параметрів системи за ступеневим законом. На підтвердження цієї тези на рис. 3 наведено графік залежності між вмістами заліза та оксиду літію.

Традиційні методи геолого-економічної оцінки ґрунтуються на загальній уяві про генезис рудних накопичень, мінералого-петрографічних, структурних, геохімічних, геофізичних та інших ознаках зруденіння. Однак у геологічній ситуації Полохівського родовища вони недостатньо інформативні з точки зору цифрового визначення бортового вмісту. Геостатистичний метод також не дає однозначної відповіді, що проілюстровано рис. 4. Гістограма і графік імовірностей розподілу вмісту оксиду літію показують суттєві розбіжності у визначенні статистичних порогів (бортів). До того ж, геостатистичний аналіз вказує на наявність всього двох різновидів мінералізації (популяцій вмісту оксиду літію), а за геологічними ознаками, як відмічалось, виділяються, як мінімум, чотири.

Таким чином, використання принципів фрактальної геометрії до обґрунтування та визначення бортового вмісту оксиду літію з метою розмежування мінералізованих зон від слабо мінералізованих і пустих порід цілком виправдане. У застосуванні до Полохівського родовища автори визначають фрактал як елементарну частинку концентрації літію, яка створена неодноразовим повторенням мінералоутворення (перехід петаліту в сподумен і назад, а також генерації цих мінералів) у загальному і безперервному циклі процесу формування родовища. Інакше кажучи, величина бортового вмісту для оконтурення рудних покладів повинна бути кратною фрактальному розміру концентрації оксиду літію. Ще раз зауважимо, що обґрунтування бортового вмісту літію для геологічної інтерпретації рудних покладів є основною початковою технічною операцією, з якої починається геолого-економічна оцінка.

Результати кількісно-розмірного фрактального аналізу

Взагалі, перевагою фрактальних моделей є те, що, на відміну від геостатистичних або традиційних методів, не потрібно проводити попередню статистичну обробку бази даних, нормалізувати та композитувати проби і навіть подавляти ураганні значення. Необхідна тільки стандартна перевірка на достовірність вихідних даних (контроль якості геологорозвідувальних робіт).



На практиці кількісно-розмірний фрактальний аналіз має на меті побудову графіку залежності концентрацій компонента від кумулятивного числа проб у логнормальному вимірі і масштабі. Процедура доволі проста і полягає у послідовному обчисленні кількості проб, середній вміст оксиду літію в сумі яких дорівнює або більше вибраних порогових значень. Кількість останніх не лімітується і може вибиратись довільно з однаковим або нерівномірним кроком. Кращою сучасною практикою є визначення кроку вимірів за шириною прямокутника логнормальної гістограми розподілу, що і зроблено в даному дослідженні.

Побудований таким чином графік залежності концентрацій оксиду літію від логнормального кумулятивного числа проб показано на рис. 5. Методика визначення статистичних порогових значень концентрації полягає у розбивці плавної кривої графіка на сегменти, які можна описати нормальним законом та графічно представити у вигляді прямої лінії. У такий спосіб проводиться розпізнавання окремих геохімічних популяцій концентрацій.

Порогові значення концентрацій оксиду літію ідентифіковані за місцями перетину прямих ліній, отриманих за допомогою рівняння регресії за методом найменших квадратів. У даному випадку таких значень виділяється три: 0,08 %, 0,72 % та 1,50 % Li_2O . Важливо, що ці значення не випадкові, а складають закономірний ряд чисел, в якому кожне послідовне значення після 1,50 % можна отримати шляхом неодноразового розділення попереднього на 2,08, а саме: $1,50/2,08 \rightarrow 0,72/2,08 \rightarrow 0,35/2,08 \rightarrow 0,17/2,08 \rightarrow 0,08 \rightarrow \infty$.

Тобто, константа 2,08 являє собою емпірично отриманий фрактальний розмір концентрації літію в межах Полохівського родовища. Використовуючи термінологію роботи [3], фізично це означає, що безрудні граніти в межах родовища (вміст Li_2O менше 0,08 %) містять в собі, як мінімум, дві зони слабо мінералізованих метасоматично змінених гранітів ($0,08 \% \leq \text{Li}_2\text{O} < 0,72 \%$), кожна з яких вміщує в собі, як мінімум, дві зони мінералізованих метасоматитів ($0,72 \% \leq \text{Li}_2\text{O} < 1,50 \%$), а кожна зона мінералізованих метасоматитів вміщує в собі, як мінімум, два поклади інтенсивно мінералізованих пегматитів ($\text{Li}_2\text{O} \geq 1,50 \%$).

Взявши отриману величину фрактального розміру 2,08 за основу, треба визначити цифру 0,08 в константі після коми в якості орієнтиру і контролю кількості проб, які за фактичним значенням Li_2O не відносяться до вибраної геохімічної популяції, але включаються в контур геологічної інтерпретації з ме-

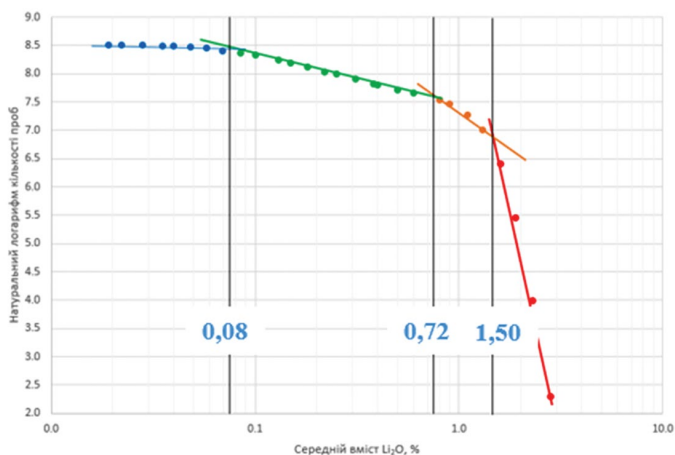


Рис. 5. Графік кількісно-розмірної логарифмічної залежності для концентрацій Li_2O Полохівського родовища

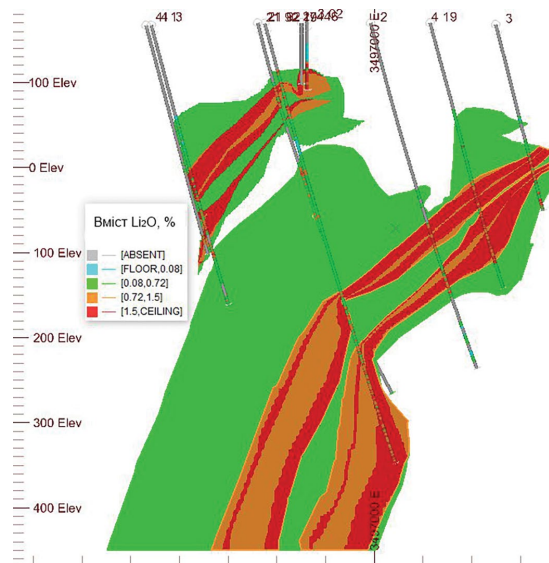


Рис. 6. Геологічний розріз по профілю 4а Полохівського родовища (поза масштабом)

тою дотримання принципу цілісності мінералізації. Головне, щоб загальна кількість таких проб у перетині не перевищувала 8 %. Тє ж саме стосується і геологічного домена безрудних гранітів, який не є об'єктом геологічної інтерпретації. Допускається наявність в ньому окремих ізольованих проб з підвищеним або аномально високим вмістом літію, які недоцільно оконтурювати.

Результат геологічної інтерпретації Полохівського родовища за описаним методом кількісно-розмірного фрактального моделювання наведено на рис. 6. Як видно, основними перевагами такого підходу є виключення фактора суб'єктивності при проведенні контура і, навпаки, інкорпорація майже всіх проб з підвищеним вмістом літію в процес геологічної інтерпретації, чого при традиційних і геостатистичних способах часто не досягається.

Іншим важливим спостереженням є те, що, як видно на рис. 6, зони мінералізованих метасоматитів просторово тяжіють до лежачого боку зон слабо мінералізованих метасоматично змінених гранітів, а поклади інтенсивно мінералізованих пегматитів тяжіють, в свою чергу, до лежачих боків зон мінералізованих метасоматитів. Автори використовують гірничий термін “лежачий бік” замість петрологічного “придонна частина”, аби підкреслити, що за допомогою фрактального моделювання на родовищі, яке розглядається, встановлена просторова анізотропія мінералізації: інтенсивно мінералізовані метасоматити і пегматити зміщені на північний схід від осової лінії Полохівського гранітного масиву.

Висновки

Як показано в даній статті, кількісно-розмірний фрактальний аналіз має значний потенціал для використання при проведенні геологічного картування, розвідці та геолого-економічній оцінці родовищ критичної мінеральної сировини. Потенційно рудоносні геохімічні аномалії чітко відокремлюються від фонових значень, чим обґрунтовується напрям пошукових і розвідувальних робіт, а діагностика мінералізації та деформацій на локальному і мікрорівнях проводиться цілеспрямовано. Як один із методів математичного аналізу, він має неабиякий потенціал при проведенні варіографії та підрахунку запасів лінійними методами, в тому числі геостатистичному. Ймовірно, це лише невелика частина можливих застосувань фракталів у геологічному вивченні та гірничій промисловості.

Насамкінець варто зазначити, що автори не мають конфлікту інтересів та іншої особистої зацікавленості з іншими організаціями, що могло би бути витлумаченим як вплив на висновки, висвітлені в даній статті.

Дане дослідження було проведене без зовнішнього фінансування.

Подяка

Автори дякують ТОВ “Укрлітвидобування” за надані загальногеологічні матеріали для проведення даного дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Василенко А. П., Ісаков Л. В. Пегматити як джерело рідкіснометалево-рідкісноземельного зруденіння в межах центральної та західної частин Українського щита // Мінер. ресурси України. – 2018. – № 4. – С. 8–11.
2. Возняк Д. К., Павлюшин В. І. Високотермобарометричні потоки рідкого CO₂ та їх роль у мінералоутворенні (на прикладі Українського щита) // Мінерал. журн. – 2001. – Т. 23, № 4. – С. 12–18.
3. Гейченко М. В., Менасова А. Ш., Білан О. В. Петрологія руд Полохівського родовища // Геологічна наука в незалежній Україні; Зб. тез наук. конф., Київ, 8–9 верес. 2021 р. – Київ, 2021. – С. 362–364.
4. Гейченко М. В., Фалькович О. Л., Менасова А. Ш., Лівенцева Г. А. Сучасний стан родовищ літєвих руд в Україні // Мінерал. журн. – 2023. – Т. 45, № 2 – С. 83–94.
5. Павлюшин В. І., Чернієнко Н. М. Літій у надрах України. Ч. 1. Поширення й форми знаходження літію в мінеральних комплексах України // Мінерал. журн. – 2023. – Т. 45, № 2 – С. 3–20.
6. Павлюшин В. І., Чернієнко Н. М. Літій у надрах України. Ч. 5. Мінералогія літєносних об’єктів: мінерали літію // Мінерал. журн. – 2024. – Т. 46, № 1. – С. 3–19.
7. Сукач В. В., Ісаков Л. В., Безвинний В. П., Шпильчак В. О. Пошуки родовищ рідкісних металів у Східноукраїнській пегматитовій області – важливий складник геологорозвідувальних робіт в Україні // Мінер. ресурси України. – 2021. – № 4. – С. 6–15.
8. Agterberg F. P. Multifractal modelling of the sizes and grades of giant and super-giant deposits // International Geology Review. – 1995. – Vol. 37. – P. 1-8.
9. Bardossy G., Fodor J. Evaluation of uncertainties and risks in geology: new mathematical approaches and their handling. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004. – 221 p.
10. Cerny P., Ericit T. S. The classification of pegmatites revised // The Canadian Mineralogist. – 2005. – Iss. 43, No. 6. – P. 2005-2026.
11. Cheng Q., Agterberg F. P., Ballantyne S. B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods // Journal of Geochemical Exploration. – 1994. – Vol. 51. – P. 109-130.
12. Gunn G. (Ed.). Critical Metals Handbook. – John Wiley and Sons Ltd, 2014. – 451 p.
13. Hayward N., Micklethwaite S. Spatial periodicity in self-organized ore systems // Special Publication Number 21. Metals, Minerals and Society. – 2018. – P. 1-24.
14. London D. Pegmatites // The Canadian Mineralogist Special Publication 10. – 2008. – 347 p.
15. London D., Burt D. M. Lithium minerals in pegmatites // Mineralogical Association of Canada short course handbook. – 1982. – No. 8. – P. 99-133.
16. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. – W. H. Freeman & Co, 1982. – 468 p.
17. Nikolis G., Prigogine I. Exploring complexity: an introduction. – W. H. Freeman & Co., 1989. – 328 p.
18. Singer D. Lognormal distribution of metal resources in mineral deposits. // Ore Geology Reviews. – 2013. – Vol. 55, November. – P. 80-86.
19. Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics. – Cambridge University Press, 1997. – 398 p.

REFERENCES

1. Vasylenko A. P., Isakov L. V. Pegmatites as a source of rare metal – rare earths ores in Central and Western parts of the Ukrainian Shield // Mineral resources of Ukraine. – 2018. – No. 4. – P. 8-11. (In Ukrainian).
2. Voznyak D. K., Pavlyshyn V. I. High-thermobarometric flows of liquid CO₂ and their role in formation of minerals (on the example of the Ukrainian Shield) // Mineralogical Journal. – 2001. – Vol. 23, No. 4. – P. 12-18. (In Ukrainian).

3. Heichenko M. V., Menasova A. Sh., Bilan O. V. Petrology of ores of the Polokhivske deposit // Geological science in independent Ukraine. Conference abstracts, Kyiv, September 8-9, 2021. – Kyiv, 2021. – P. 362-364. (In Ukrainian).
4. Heichenko M. V., Falkovich O. L., Menasova A. Sh., Liventseva G. A. Current state of lithium ore deposits in Ukraine // Mineralogical Journal. – 2023. – Vol. 45, No. 2 – P. 83-94. (In Ukrainian).
5. Pavlyshyn V. I., Cherniyenko N. M. Lithium in Ukraine’s interior. Part 1. Distribution and forms of occurrence of lithium in mineral complexes of Ukraine // Mineralogical Journal. – 2023. – Vol. 45, No. 2. – P. 3-20. (In Ukrainian).
6. Pavlyshyn V. I., Cherniyenko N. M. Lithium in Ukraine’s interior. Part 5. Mineralogy of lithium-bearing objects: minerals of lithium // Mineralogical Journal. – 2024. – Vol. 46, No. 1. – P. 3-19. (In Ukrainian).
7. Soukach V. V., Isakov L. V., Bezvynnyy V. P., Shpilchak V. O. Exploration for rare-metal deposits in the Eastern-Ukrainian pegmatite field – important constituent of exploration works in Ukraine // Mineral resources of Ukraine. – 2021. – No. 4. – P. 6-15. (In Ukrainian).
8. Agterberg F. P. Multifractal modelling of the sizes and grades of giant and super-giant deposits // International Geology Review. – 1995. – Vol. 37. – P. 1-8.
9. Bardossy G., Fodor J. Evaluation of uncertainties and risks in geology: new mathematical approaches and their handling. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004. – 221 p.
10. Cerny P., Ericit T. S. The classification of pegmatites revised // The Canadian Mineralogist. – 2005. – Iss. 43, No. 6. – P. 2005-2026.
11. Cheng Q., Agterberg F. P., Ballantyne S. B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods // Journal of Geochemical Exploration. – 1994. – Vol. 51. – P. 109-130.
12. Gunn G. (Ed.). Critical Metals Handbook. – John Wiley and Sons Ltd, 2014. – 451 p.
13. Hayward N., Micklethwaite S. Spatial periodicity in self-organized ore systems // Special Publication Number 21. Metals, Minerals and Society. – 2018. – P. 1-24.
14. London D. Pegmatites // The Canadian Mineralogist Special Publication 10. – 2008. – 347 p.
15. London D., Burt D. M. Lithium minerals in pegmatites // Mineralogical Association of Canada short course handbook. – 1982. – No. 8. – P. 99-133.
16. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. – W. H. Freeman & Co, 1982. – 468 p.
17. Nikolis G., Prigogine I. Exploring complexity: an introduction. – W. H. Freeman & Co., 1989. – 328 p.
18. Singer D. Lognormal distribution of metal resources in mineral deposits. // Ore Geology Reviews. – 2013. – Vol. 55, November. – P. 80-86.
19. Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics. – Cambridge University Press, 1997. – 398 p.

Рукопис отримано 13.06.2024.

