

А.В. Панасюк, к.т.н., доц.
І.В. Давидова, к.с.-г.н., доц.
С.С. Іськов, к.т.н., доц.
Д.С. Поліщук, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Оптимізація параметрів підземної розробки пегматитових родовищ на основі критеріїв перспективності та продуктивності

Розроблено комплексний підхід до оптимізації параметрів підземної розробки пегматитових родовищ, що ґрунтується на встановлених закономірностях впливу структурних характеристик пегматитових тіл на їх продуктивність. Проведені дослідження показали, що саме зональна будова, потужність окремих зон та якісні ознаки мінералів визначають рівень промислової цінності родовища. На основі цих положень сформульовано об'єднаний критерій перспективності, що інтегрує ключові геологічні параметри – загальну потужність пегматитового тіла, просторово-генетичні особливості його внутрішньої будови та колір польових шпатів як показник якості сировини.

Встановлені математичні залежності між продуктивністю та параметрами пегматитових тіл вирізняються високим ступенем достовірності та дають змогу не лише уточнити прогнозування економічного потенціалу родовища, але й оптимізувати просторове розміщення гірничих виробок. Запропонована методика дозволяє зменшити обсяг розкривних робіт, скоротити довжину підхідних виробок і тим самим підвищити ефективність видобування п'єзооптичної сировини.

Додатково розроблено методику поділу родовища на шахтні поля з урахуванням геологічних та структурних особливостей, що забезпечує раціональне використання ресурсів та оптимізацію системи розкриття. Важливим практичним результатом дослідження стало створення програмного продукту для автоматизованого визначення перспективності пегматитових тіл. Він дає можливість швидко й з високою точністю виконувати розрахунки геологічних параметрів, визначати раціональні межі шахтних полів та оперативно формувати вихідні дані для проєктування гірничих робіт. Це значно підвищує ефективність планування та створює передумови для більш повного й екологічно безпечного освоєння мінерально-сировинної бази.

Ключові слова: пегматитові родовища; підземна розробка; критерій перспективності; оптимізація гірничих виробок; продуктивність; зональна будова; маркшейдерське забезпечення; проєктування.

Актуальність теми. Розробка пегматитових родовищ п'єзооптичної сировини є важливою складовою мінерально-сировинної бази України. Пегматитові тіла характеризуються складною зональною будовою, значною мінливістю якісних показників корисних копалин та нерівномірним розподілом цінних мінералів у просторі. Ці особливості визначають специфічні вимоги до технологій видобування й обумовлюють необхідність детального вивчення закономірностей формування та будови пегматитових тіл для оптимізації параметрів гірничих робіт.

Традиційні підходи до оцінки перспективності пегматитових тіл базуються переважно на якісних показниках та експертних оцінках, що не завжди забезпечує достатню точність прогнозування продуктивності. Відсутність комплексних кількісних критеріїв оцінки перспективності призводить до неоптимального розміщення гірничих виробок, збільшення об'ємів розкривних робіт та зниження економічної ефективності розробки родовищ.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованої методики комплексної оцінки перспективності пегматитових тіл та оптимізації параметрів підземних гірничих виробок для підвищення ефективності видобування п'єзооптичної сировини.

Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей впливу структури та параметрів пегматитових тіл на їх продуктивність і перспективність, у розробленні методики оптимізації параметрів підземної розробки на основі комплексного критерію перспективності.

Аналіз сучасного стану проблеми. Дослідження пегматитових родовищ та технологій їх розробки проводилися багатьма вченими протягом десятиліть. Основні підходи до оцінки перспективності пегматитових тіл базуються на аналізі геологічних факторів, враховуючи потужність тіл, зональну будову, мінералогічний склад та структурно-текстурні особливості. Проте існуючі методики оцінки перспективності мають суттєві недоліки, зокрема відсутність комплексного підходу до врахування всіх

факторів впливу, недостатню точність прогнозування продуктивності, складність практичного застосування на стадії проектування та обмежені можливості оптимізації параметрів гірничих виробок.

Зарубіжний досвід розробки пегматитових родовищ демонструє ефективність застосування математичного моделювання та оптимізаційних методів для планування гірничих робіт. Однак специфічні геологічні умови українських родовищ вимагають розробки адаптованих підходів та методик, які враховують особливості зональної будови пегматитових тіл та їх мінералогічного складу.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися на Волинському родовищі п'єзооптичної сировини, що є одним з найбільших в Україні. Основні роботи виконувалися на Вишняківській ділянці, розташованій у центральній частині родовища, де пегматитові тіла сконцентровані групами, мають середні розміри та характеризуються високою продуктивністю.

Відбір проб здійснювався за методикою дослідження керн, отриманого колонковим бурінням геолого-розвідувальних свердловин. Для кожного пегматитового тіла визначалася загальна потужність пегматиту, потужність окремих зон та їх послідовність, колір польових шпатів за стандартними еталонами, мінералогічний склад зон та структурно-текстурні особливості. Колір польових шпатів оцінювався за спеціально розробленими еталонами кольору з присвоєнням відповідних коефіцієнтів значущості.

Статистична обробка результатів проводилася з використанням програмних пакетів. Для забезпечення достовірності результатів застосовувався апарат математичної статистики, а мінімальна кількість дослідів розраховувалася для кожного типу залежностей окремо.

Для встановлення залежності умовної продуктивності пегматитового тіла від його потужності проводилися дослідження на вже відпрацьованих тілах. У процесі експериментальних досліджень вимірювалася умовна маса корисних компонентів, вилучених з даного тіла $M_{ум}$, що визначалася за допомогою такого виразу:

$$M_{ум} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i', \quad (1)$$

де m_i – потужність i -ї зони пегматитового тіла;

C_i' – вміст корисних мінералів в i -й зоні пегматитового тіла.

На основі аналізу пегматитових тіл різної потужності в діапазоні від 5 до 50 м встановлено параболічну залежність між умовною продуктивністю тіла $M_{ум}$ та його потужністю m (рис. 1). Математичний вираз цієї залежності має вигляд:

$$M_{ум} = 0,0005 \cdot m^2 - 0,0128 \cdot m + 0,1229. \quad (2)$$

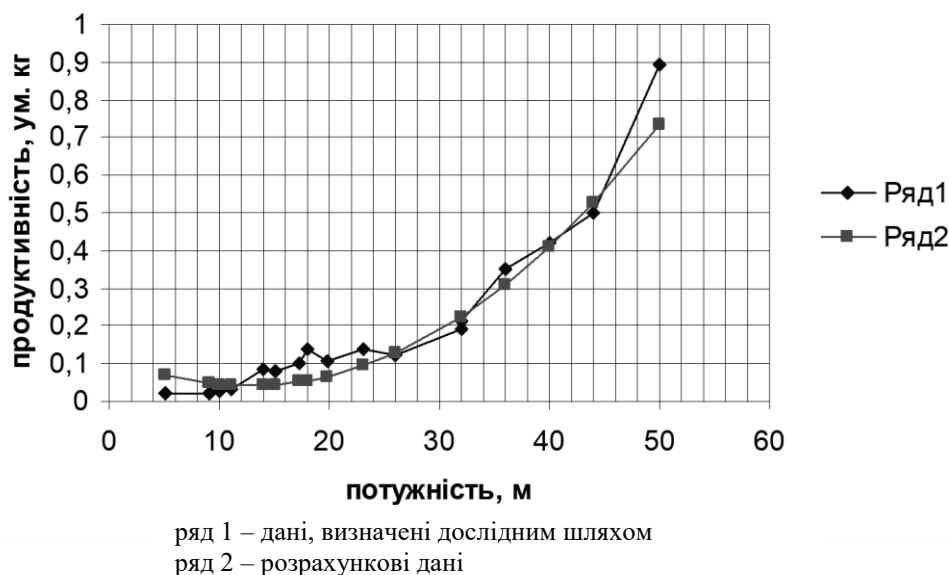


Рис. 1. Графік залежності продуктивності тіла від його потужності

Дослідження зональної будови пегматитових тіл показало, що розподіл потужностей окремих зон має чіткі математичні закономірності, які безпосередньо залежать від загальної потужності тіла. Встановлені залежності виявилися лінійними й вирізняються дуже високим ступенем узгодженості, що свідчить про їх надійність і достовірність.

Найбільший інтерес становить графічна зона, що відіграє ключову роль у промисловому освоєнні пегматитів. Для неї характерна чітка тенденція зростання потужності зі збільшенням розмірів усього тіла, що підтверджується високою точністю отриманих рівнянь. Водночас статистична перевірка показала вузькі довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії, що підкреслює стабільність та сталість виявлених залежностей.

Пегматоїдно-графічна зона, яка вирізняється змішаним мінералогічним складом і поєднує риси як графічної, так і пегматоїдної, демонструє подібну, хоча й дещо менш виражену, закономірність. Потужність цієї зони також прямо пропорційно зростає із загальною потужністю пегматитового тіла, проте характер залежності виявляється більш пологим, що відповідає її проміжному положенню в зональній будові.

Пегматоїдна зона, представлена передусім польовими шпатами й кварцом, характеризується найбільш стабільною та передбачуваною залежністю. Тут чітко простежується майже ідеальна пропорційність між збільшенням розмірів тіла і зростанням потужності цієї зони, що робить її важливим орієнтиром під час прогнозування будови пегматитових масивів.

Польовошпатова зона, що має значення як джерело керамічної сировини, вирізняється своєю регулярністю й високою точністю співвідношень. Вона демонструє сталі темпи зростання, що забезпечує її цінність для промислових розробок. Аналогічну чіткість проявляє й блокова зона з великокристалічною структурою. В обох випадках залежності є дуже надійними, що дозволяє робити впевнені прогнози стосовно їхньої потужності у нових родовищах.

Зона сірого кварцу містить важливий технічний матеріал. Для цієї зони лінійна залежність супроводжується наявністю певного зсуву, що свідчить про особливості формування цієї зони в процесі кристалізації. Подібну поведінку в формуванні кристалосировини проявляє й зона вилужування, яка утворилася внаслідок гіпергенних процесів. У цьому випадку також простежується лінійна залежність, однак із вираженими особливостями, зумовленими вторинними перетвореннями.

Найбільш варіативною виявилася зона занорищу, представлена дрібнозернистим матеріалом. Для неї характерна стійка, однак менш точна залежність, що пояснюється складністю умов її формування та неоднорідністю складу. Незважаючи на це, навіть у такій зоні спостерігається загальна тенденція до зростання потужності відповідно до збільшення розмірів тіла, що підтверджує універсальність виявлених закономірностей.

Можна стверджувати, що всі зони пегматитових тіл підпорядковуються єдиному принципу пропорційного розвитку, хоч і з певними відмінностями у деталях, що в подальшому дає можливість більш точного прогнозування внутрішньої будови пегматитів і підвищує ефективність їхнього промислового освоєння.

Комплексний аналіз факторів, що впливають на перспективність пегматитових тіл, виявив необхідність одночасного врахування потужності тіла, зональної будови та кольору польових шпатів. На основі цього аналізу розроблено об'єднаний критерій перспективності пегматитового тіла, який математично виражається формулою:

$$D = \left(\sum \frac{m_{zi}}{m_T} \cdot C_i \right) \cdot k_k, \quad (3)$$

де D – об'єднаний критерій перспективності пегматитового тіла;

m_{zi} – потужність i -ї зони;

m_T – потужність пегматитового тіла;

C_i – коефіцієнт вартості корисних компонентів в i -й зоні;

k_k – коефіцієнт кольору польових шпатів пегматитового тіла.

Коефіцієнти вартості C_i визначалися на основі ретельного аналізу ринкової вартості різних видів пегматитової сировини та встановлювалися індивідуально для кожної зони.

Коефіцієнт кольору k_k враховує якісні характеристики польових шпатів та варіює залежно від кольору. Рожевий колір польових шпатів, що вказує на найвищу якість сировини, білий колір, який також свідчить про високу якість, має базове значення, сірий колір польових шпатів та темний колір вказують на найнижчу якість.

На основі розробленого об'єднаного критерію D було створено комплексний критерій перспективності P , який інтегрує всі основні фактори впливу на продуктивність пегматитових тіл. Статистичний аналіз експериментальних даних дозволив встановити лінійну залежність між цими показниками (рис. 2):

$$P_{\text{нез}} = 0,796 \cdot (D)^{0,1757}. \quad (4)$$

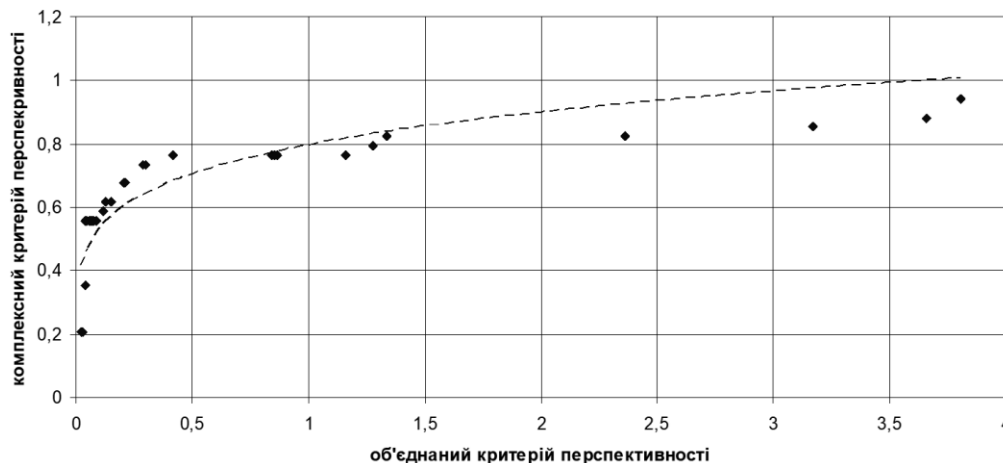


Рис. 2. Графік залежності комплексного критерію перспективності від об'єднаного критерію перспективності

При цьому проведений дисперсійний аналіз підтвердив статистичну значущість встановленої залежності, що дозволяє використовувати її для прогнозування перспективності пегматитових тіл на основі даних колонкового буріння.

Для автоматизації процесу визначення перспективності пегматитових тіл було розроблено спеціалізований програмний продукт «Перспективність», що призначений для оперативного розрахунку геологічних параметрів на основі встановлених емпіричних залежностей та забезпечує високу точність обчислень при мінімальних затратах часу.

Функціональні можливості програми враховують введення вихідних даних про параметри пегматитового тіла, автоматичний розрахунок потужностей усіх зон за отриманими емпіричними формулами, визначення об'єднаного критерію перспективності з урахуванням коефіцієнтів вартості та кольору, обчислення комплексного критерію перспективності та збереження результатів у стандартному текстовому форматі для подальшої обробки.

Аналіз просторового розташування пегматитових тіл, їх продуктивності та геологічних особливостей Волинського родовища дозволив науково обґрунтувати поділ всієї території на чотири оптимальні шахтні поля з раціональними параметрами системи розкриття.

Критеріями для виділення шахтних полів слугували наявність груп пегматитових тіл з підрахованими запасами категорії С₂, а також продуктивних пегматитів за результатами пошукового буріння, сприятливі геологічні умови для виявлення нових пегматитових тіл та оптимальні розміри територій для ефективної розробки підземним способом.

Шахтне поле першого типу розташоване в південній частині Вишняківської ділянки та північній частині Дворищанської ділянки, займає площу розмірами 2200 на 600–1000 метрів та характеризується системою розкриття, що включає два вертикальні стволи з головними відкотними штреками на трьох видобувних горизонтах.

Друге шахтне поле знаходиться в центральній частині Дворищанської ділянки та має розміри 1200–1400 на 1000–1200 метрів. Система розкриття цього поля передбачає використання трьох вертикальних стволів з розгалуженою мережею головних штреків, що забезпечує ефективний доступ до вісімнадцяти груп пегматитових тіл.

Третє шахтне поле займає північну частину Вишняківської ділянки на площі 700 на 500–700 метрів. Компактні розміри цього поля дозволяють використовувати систему розкриття з двома вертикальними стволами та спрощеною схемою головних виробок для розробки восьми груп пегматитових тіл.

Четверте шахтне поле розташоване в центральній частині Вишняківської ділянки та має розміри 1000 на 600–700 метрів. Система розкриття включає два вертикальних стволи з оптимізованою мережею штреків для ефективного освоєння десяти груп пегматитових тіл.

Запропонований поділ на шахтні поля забезпечує значні технічні та економічні переваги. Зменшення об'єму гірничопідготовчих виробок на 15–20 % досягається завдяки оптимізації траси головних штреків та скороченню довжини підхідних виробок. Скорочення площі земної поверхні, схильної до зрушень, сприяє зменшенню екологічного впливу розробки родовища. Покращення ефективності провітрювання виробок досягається за рахунок оптимальної конфігурації вентиляційних мереж. Оптимізація транспортних схем дозволяє зменшити витрати на переміщення корисних копалин та породи. Можливість

поетапного освоєння родовища забезпечує гнучкість у плануванні капітальних вкладень та дозволяє адаптуватися до змін ринкової кон'юнктури.

Розроблена методика визначення оптимальних параметрів розміщення гірничих виробок базується на принципі мінімізації об'єму розкривних робіт з одночасним урахуванням перспективності окремих пегматитових тіл. Математична модель оптимізації використовує систему нерівностей, що описують умови оптимального розміщення головної розкривної виробки у тривимірному просторі.

Для визначення координат місцезонашування та напрямків проведення розкривних виробок використовувалися залежності, які задовольняють наступні умови:

$$\sum P_{nez(X;Y;Z)}^{np} + P_{nezl} \geq \sum P_{nez(X;Y;Z)}^{lis}; \quad (5)$$

$$\sum P_{nez(X;Y;Z)}^{np} \leq P_{nezl} + \sum P_{nez(X;Y;Z)}^{lis}. \quad (6)$$

Аналогічні умови застосовуються для визначення оптимальних координат за осями y та z , що дозволяє знайти тривимірне положення головного ствола, яке забезпечує мінімальні затрати на проходку підхідних виробок до всіх пегматитових тіл з урахуванням їх відносної цінності.

Практичне застосування розробленої методики для першого шахтного поля, що містить двадцять п'ять груп пегматитових тіл, дозволило визначити оптимальні координати розміщення головного ствола.

Оптимізація напрямків головних штреків проводилася з метою мінімізації загальної довжини підхідних виробок до окремих груп пегматитових тіл. Розрахунки дирекційних кутів дали можливість визначити орієнтацію підготовчих та виїмкових штреків.

Техніко-економічне обґрунтування запропонованої схеми розміщення виробок демонструє значні переваги оптимізованого підходу, а саме: скорочення загальної довжини підхідних виробок на вісімнадцять відсотків досягається завдяки науково обґрунтованому вибору місця розташування головного ствола, зменшення об'єму розкривних робіт, скорочення капітальних витрат на проходку. Підвищення швидкості доступу до продуктивних пегматитів сприяє скороченню термінів підготовки родовища до промислової експлуатації.

Розроблена принципова схема комплексної системи підземних гірничих виробок органічно поєднує традиційні функції розкриття, підготовки та видобування з інноваційними підходами до пошуково-розвідувальної діяльності. Така інтеграція забезпечує максимальне використання інформаційного потенціалу кожної виробки та підвищує загальну ефективність освоєння родовища.

Основними розкривними виробками системи є вертикальні шахтні стволи глибиною від 150 до 200 метрів, що забезпечують надійний доступ до продуктивних горизонтів родовища, головні відкотні штреки прокладаються на основних робочих горизонтах та з'єднують шахтні стволи між собою, створюючи єдину транспортну мережу, вентиляційні виробки та людські ходи забезпечують безпечні умови праці та ефективне провітрювання всіх підземних просторів. Допоміжні виробки містять розсічки з головних штреків, що ведуть до окремих груп пегматитових тіл, підхідні виробки різної конфігурації для доступу до конкретних пегматитових тіл, спеціалізовані камери для розміщення бурового обладнання та різноманітні складські і технічні приміщення для забезпечення виробничих потреб. Очисні виробки розробляються безпосередньо в пегматитових тілах та включають камери для селективного видобування різних видів сировини, підготовчі виробки для створення робочих фронтів та вентиляційні з'єднання для забезпечення провітрювання очисних вибоїв.

Особливістю запропонованої системи є інтеграція пошуково-розвідувальних виробок, що враховують свердловини підземного колонкового буріння для детальної розвідки перспективних ділянок, розвідувальні штреки та орти для безпосереднього вивчення геологічної будови масиву, а також мережу геофізичних профілів та точок спостережень для моніторингу геологічних процесів.

Ефективне управління гірничими роботами на пегматитових родовищах вимагає впровадження комплексної системи контролю та моніторингу, що охоплює геологічні, технологічні та екологічні аспекти розробки. Така система забезпечує оперативне отримання інформації про стан родовища та дозволяє своєчасно корегувати параметри гірничих робіт.

Геологічний контроль передбачає постійне оновлення геологічної інформації на основі даних, отриманих під час проходки виробок та бурових робіт. Контроль за зміною параметрів пегматитових тіл дозволяє виявляти нові продуктивні зони та корегувати планові показники видобування. Прогнозування розташування невідомих пегматитових тіл здійснюється на основі встановлених геологічних закономірностей та результатів геофізичних досліджень.

Технологічний контроль включає моніторинг параметрів очисних робіт для забезпечення оптимальних режимів видобування, систематичний контроль за технічним станом гірничих виробок для запобігання аваріям та оптимізацію технологічних процесів на основі аналізу виробничих показників.

Екологічний моніторинг передбачає регулярний контроль за станом земної поверхні для виявлення ознак зрушень, систематичне спостереження за рівнем та якістю підземних вод, а також комплексну оцінку впливу гірничих робіт на навколишнє природне середовище.

Комплексний техніко-економічний аналіз розроблених рішень демонструє їх високу ефективність як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. Прямий економічний ефект від впровадження запропонованої методики враховує підвищення ефективності видобування за рахунок оптимізації параметрів гірничих виробок та точного прогнозування продуктивності пегматитових тіл. Скорочення капітальних витрат досягається завдяки раціональному розміщенню розкривних виробок та зменшенню обсягів непродуктивних робіт. Зменшення експлуатаційних витрат забезпечується оптимізацією транспортних схем та підвищенням ефективності очисних робіт. Підвищення повноти видобування стає можливим завдяки точному визначенню меж продуктивних зон та селективному видобуванню різних типів сировини.

Додатковий економічний ефект включає скорочення термінів геологорозвідувальних робіт на двадцять відсотків завдяки використанню розроблених критеріїв перспективності, підвищення точності прогнозування запасів внаслідок застосування математичних моделей, оптимізацію використання гірничого обладнання через раціональне планування робіт та зменшення ризиків під час планування гірничих робіт завдяки науково обґрунтованому підходу.

Подальший розвиток досліджень у галузі оптимізації підземної розробки пегматитових родовищ може бути спрямований на удосконалення критеріїв перспективності шляхом врахування додаткових геологічних факторів, таких як тектонічні порушення, гідрогеологічні умови та геомеханічні властивості вміщуючих порід. Розробка динамічних моделей дозволить здійснювати корекцію параметрів гірничих виробок безпосередньо у процесі експлуатації родовища на основі нової геологічної інформації, отриманої під час ведення гірничих робіт.

Створення експертних систем для автоматизованого планування гірничих робіт на основі накопиченої геологічної інформації та встановлених закономірностей сприятиме підвищенню ефективності проєктування та зменшенню впливу суб'єктивного фактора на прийняття рішень. Адаптація розробленої методики для інших типів родовищ корисних копалин зі складною внутрішньою структурою розширить область її практичного застосування.

Інтеграція з геоінформаційними технологіями забезпечить можливості тривимірного моделювання родовищ та візуалізації результатів планування гірничих робіт, що значно спростить процес прийняття управлінських рішень та підвищить якість геологічного обґрунтування проєктних рішень.

Висновки. Встановлення залежності продуктивності пегматитових тіл від їх потужності забезпечує можливість достовірного прогнозування економічного потенціалу родовища на стадії геологорозвідувальних робіт. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо доцільності промислового освоєння окремих пегматитових тіл та оптимізувати черговість їх відпрацювання.

Визначення системи лінійних залежностей потужностей восьми основних зон пегматитових тіл від загальної потужності створює надійну основу для точного планування розподілу різних видів корисних компонентів у просторі родовища. Це забезпечує можливість селективного видобування та підвищення якості товарної продукції.

Розробка об'єднаного критерію перспективності пегматитових тіл, який комплексно враховує потужність тіла, зональну будову та колір польових шпатів, підвищує точність оцінки економічного потенціалу родовища порівняно з традиційними методами. Це дозволяє більш обґрунтовано підходити до планування капітальних вкладень та прогнозування прибутковості гірничого підприємства.

Обґрунтування поділу Волинського родовища на чотири шахтних поля з оптимальними параметрами системи розкриття забезпечує зменшення об'єму гірничопідготовчих виробок, що безпосередньо впливає на зниження капітальних витрат на будівництво підприємства та експлуатаційних витрат на підтримання виробок.

Розробка методики оптимізації розміщення гірничих виробок на основі мінімізації об'єму розкривних робіт з урахуванням перспективності пегматитових тіл дозволяє скоротити загальну довжину підхідних виробок на 18 %. Це забезпечує суттєве зниження витрат на транспортування корисних копалин та підвищення оперативності доступу до продуктивних зон. Запропонована комплексна система підземних гірничих виробок органічно поєднує традиційні функції розкриття, підготовки та видобування з інноваційними підходами до пошуково-розвідувальної діяльності, що підвищує загальну ефективність освоєння родовища, така інтеграція максимально використовує інформаційний потенціал кожної виробки та забезпечує синергетичний ефект від поєднання різних видів гірничих робіт.

Техніко-економічний аналіз демонструє можливість скорочення капітальних та експлуатаційних витрат при застосуванні розробленої методики. Додатково досягається підвищення повноти видобування та скорочення термінів геологорозвідувальних робіт, що значно покращує техніко-економічні показники розробки родовища.

Розроблена методика може бути успішно адаптована для оптимізації параметрів розробки інших родовищ пегматитової сировини з аналогічними геологічними умовами. Крім того, основні принципи методики можуть застосовуватися для родовищ інших корисних копалин, що характеризуються складною внутрішньою структурою та значною мінливістю якісних показників у просторі.

Список використаної літератури:

1. Phelps P.R. Episodes of fast crystal growth in pegmatites / P.R. Phelps, C.-T.A. Lee, D.M. Morton // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11, № 4986. DOI: 10.1038/s41467-020-18806-w.
2. Fanka A. Petrology and geochemistry of Li-bearing pegmatites: Case studies and implications for exploration / A.Fanka, J.Tadthai // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – Vol. 11. DOI: 10.3389/feart.2023.1221485.
3. Rare element minerals' assemblage and zonation in El Quemado pegmatites / V.López de Azarevich, P.Fulignati, A.Gioncada, M.Azarevich // *European Journal of Mineralogy*. – 2021. DOI: 10.1007/s00710-021-00752-0.
4. Hyperspectral remote sensing case study for rapid identification of Li-rich pegmatites (Dahongliutan, NW China) / L.Chen, N.Zhang, T.Zhao and others // *Remote Sensing*. – 2023. DOI: 10.3390/rs15020493.
5. Alford C. Optimisation in underground mining / C.Alford, M.Brazil, D.H. Lee // *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. – 2007. – P. 561–577. DOI: 10.1007/978-0-387-71815-6_30.
6. Mining plan optimization of multi-metal underground deposits: Multi-objective models for economic efficiency and grade control / Y.Zhao, J.Chen, S.Yang, Y.Chen // *Mathematics*. – 2022. DOI: 10.3390/math10142418.
7. Popov D.V. Do pegmatites crystallise fast? Growth rates versus isotopic constraints / D.V. Popov // *Geosciences*. – 2023. DOI: 10.3390/geosciences13100297.
8. Пегматити Сурської та Верхівцівської зеленокам'яних структур Середнього Придніпров'я, Український щит / В.В. Сукач, Л.В. Ісаков, К.І. Гоголев та ін. // *Мінеральні ресурси України*. – 2023. DOI: 10.31996/mru.2023.3.8-16.
9. Geochronology of granites of the western Korosten AMCG complex (Ukrainian Shield): Implications for the emplacement history and origin of miarolitic pegmatites / L.Shumlyanskyy, G.Franz, S.Glynn and others // *European Journal of Mineralogy*. – 2021. DOI: 10.5194/ejm-33-703-2021.
10. Павлюшин В.І. Літій у надрах України. Частина 2. Мінералогія літійсодержущих пегматитів Волині / В.І. Павлюшин // *Mineralogical Journal (Ukraine)*. – 2023.
11. Сукач В.В. Пошуки родовищ рідкісних металів у Західноукраїнській пегматитовій області, літій, Шевченківське родовище / В.В. Сукач // *Мінеральні ресурси України*. – 2021.
12. Keyser A. Alpine eclogite-facies modification of Li-Cs-Ta pegmatite dikes: Implications for metamorphic overprint vs. magmatic zoning / A.Keyser // *Mineralium Deposita*. – 2023. DOI: 10.1007/s00126-023-01176-w.

References:

1. Phelps, P.R., Lee, C.-T.A. and Morton, D.M. (2020), «Episodes of fast crystal growth in pegmatites», *Nature Communications*, Vol. 11, No. 4986, doi: 10.1038/s41467-020-18806-w.
2. Fanka, A. and Tadthai, J. (2023), «Petrology and geochemistry of Li-bearing pegmatites: Case studies and implications for exploration», *Frontiers in Earth Science*, Vol. 11, doi: 10.3389/feart.2023.1221485.
3. López de Azarevich, V., Fulignati, P., Gioncada, A. and Azarevich, M. (2021), «Rare element minerals' assemblage and zonation in El Quemado pegmatites», *European Journal of Mineralogy*, doi: 10.1007/s00710-021-00752-0.
4. Chen, L., Zhang, N., Zhao, T. et al. (2023), «Hyperspectral remote sensing case study for rapid identification of Li-rich pegmatites (Dahongliutan, NW China)», *Remote Sensing*, doi: 10.3390/rs15020493.
5. Alford, C., Brazil, M. and Lee, D.H. (2007), «Optimisation in underground mining», *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, pp. 561–577, doi: 10.1007/978-0-387-71815-6_30.
6. Zhao, Y., Chen, J., Yang, S. and Chen, Y. (2022), «Mining plan optimization of multi-metal underground deposits: Multi-objective models for economic efficiency and grade control», *Mathematics*, doi: 10.3390/math10142418.
7. Popov, D.V. (2023), «Do pegmatites crystallise fast? Growth rates versus isotopic constraints», *Geosciences*, doi: 10.3390/geosciences13100297.
8. Sukach, V.V., Isakov, L.V., Hoholev, K.I. et al. (2023), «Pegmatyty Surskoi ta Verkhivtsivskoi zelenokamianykh struktur Serednoho Prydniprovia, Ukrainysky shchyt», *Mineralni resursy Ukrainy*, doi: 10.31996/mru.2023.3.8-16.
9. Shumlyanskyy, L., Franz, G., Glynn, S. et al. (2021), «Geochronology of granites of the western Korosten AMCG complex (Ukrainian Shield): Implications for the emplacement history and origin of miarolitic pegmatites», *European Journal of Mineralogy*, doi: 10.5194/ejm-33-703-2021.
10. Pavlyshyn, V.I. (2023), «Litii u nadrah Ukrainy. Chastyina 2. Mineralohiia litiienosnykh pegmatyiv Volyni», *Mineralogical Journal (Ukraine)*.
11. Sukach, V.V. (2021), «Poshuky rodovyshch ridkisnykh metaliv u Zakhidnoukrainskii pegmatyivii oblasti, litii, Shevchenkivske rodovyshche», *Mineralni resursy Ukrainy*.
12. Keyser, A. (2023), «Alpine eclogite-facies modification of Li-Cs-Ta pegmatite dikes; Implications for metamorphic overprint vs. magmatic zoning», *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-023-01176-w.

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- підземні гірничі роботи;
- оцінка ресурсів.

Давидова Ірина Володимирівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0001-6535-3948>.

Наукові інтереси:

- промислова екологія;
- екологія гірничого виробництва;
- картографічні методи в екології;
- радіоекологія;
- ресурсо- та енергозбереження.

Іськов Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<http://orcid.org/0000-0002-9618-489X>.

Наукові інтереси:

- проектування гірничих підприємств;
- геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

Поліщук Дмитро Сергійович – здобувач освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0009-0007-4257-8037>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі.

Panasiuk A.V., Davydova I.V., Iskov S.S., Polischuk D.S.

Optimization of underground mining parameters for pegmatite deposits based on prospectivity and productivity criteria

A comprehensive approach to optimizing the parameters of underground mining of pegmatite deposits has been developed, grounded in the established regularities of the influence of structural characteristics of pegmatite bodies on their productivity. The conducted research demonstrated that the zonal structure, the thickness of individual zones, and the qualitative features of minerals are key determinants of the industrial value of a deposit. Based on these findings, a unified perspective criterion was formulated, integrating essential geological parameters, namely the overall thickness of the pegmatite body, the spatial and genetic features of its internal structure, and the color of feldspars as an indicator of raw material quality.

The identified mathematical relationships between productivity and pegmatite body parameters exhibit a high degree of reliability, enabling not only a more accurate forecast of the economic potential of deposits but also the optimization of the spatial arrangement of mine workings. The proposed methodology makes it possible to reduce the volume of overburden, shorten the length of access drifts, and thereby increase the efficiency of piezo-optical raw material extraction.

A methodology for dividing deposits into mining fields was also developed, considering geological and structural features to ensure rational resource utilization and optimized opening systems. An important practical outcome of the study is the creation of specialized software for the automated assessment of pegmatite body perspective. This tool enables rapid and highly accurate calculation of geological parameters, determination of optimal boundaries of mining fields, and prompt generation of input data for mine design. Such advancements significantly improve planning efficiency and create prerequisites for more comprehensive and environmentally sustainable mineral resource-based exploitation.

Keywords: pegmatite deposits; underground mining; perspective criterion; optimization of mine workings; productivity; zonal structure; mine surveying support; design.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2025.