

УДК 550.4:553.3(477.42)

ХІМІЧНИЙ СКЛАД І ЛАТЕРАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ІЛЬМЕНІТУ ТА ЗМІНЕНИХ ЙОГО ВІДМІН НА ДІЛЯНКАХ ЄМИЛІВСЬКА Й СЕРЕДНЯ МЕЖИРІЧНОГО РОДОВИЩА ТИТАНУ (ЖИТОМИРСЬКА ОБЛ.)

Миرون Ковальчук, д-р геол. наук, проф., зав. відділу літології
kms1964@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-9265-9707>

Любов Фігура, канд. геол. наук, старший дослідник, учений секретар
liuba_figura@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-8009-2854>

*Інститут геологічних наук НАН України,
вул. Олесь Гончара, 55б, Київ, Україна, 01601*

Досліджено хімічний склад ільменіту з нижньокрейдових алювіальних каолінових пісків іршанської світи на ділянках Ємилівська й Середня Межирічного родовища титанових руд (Волинський мегаблок Українського щита). Це дало змогу виявити його варіації на різних ділянках і виконати порівняльний аналіз. Кореляційним аналізом визначено напрям і силу кореляційних зв'язків між оксидами, а також спільні закономірності й суттєві відмінності у взаємозв'язках між оксидами. Сильна негативна кореляція між FeO та Fe₂O₃ і позитивна – між TiO₂ та Fe₂O₃ відображає баланс між відновленою й окисненою формами заліза в ільменіті.

Для виокремлення магматичного ільменіту, псевдуриту та лейкоксенованого ільменіту застосовано два підходи: 1) за співвідношенням FeO/Fe₂O₃, що дає змогу швидко класифікувати зерна; 2) за поєднанням зазначеного співвідношення з абсолютними концентраціями FeO та Fe₂O₃, що забезпечує точнішу інтерпретацію. Завдяки такому підходу підтверджено наявність як первинного магматичного ільменіту, так і змінених його відмін, утворених за екзогенних умов. Виконано порівняльний аналіз процесів псевдуритизації й лейкоксенізації ільменіту в межах Ємилівської й Середньої ділянок.

Фрактальний аналіз просторового поширення магматичного ільменіту та його змінених форм засвідчив, що їх розподіл має ознаки самоподібності та структурної організації, а це відображає природні процеси диференціації і вторинної трансформації.

Виконано картографічне моделювання ареалів поширення ільменіту різного хімічного складу та з різним співвідношенням FeO/Fe₂O₃, яке дає змогу визначити ступінь екзогенного перетворення, прогнозувати ареали поширення ільменіту з різними якісними характеристиками, реконструювати умови формування розсипів та оптимізувати промислове освоєння залишкових запасів у межах досліджених ділянок. У запропонованій комплексній моделі інтегровано хімічні, мінералогічні та просторові дані. Це забезпечує глибше розуміння генезису ільменітових розсипищ, їхньої хімічної зональності й потенціалу для промислового розроблення.

Ключові слова: ільменіт, псевдурит, лейкоксенізація, хімічний склад, вторинні зміни, розсипище, латеральний розподіл, кореляційний аналіз, картографування, Межирічне родовище, Український щит.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.02>

Постановка проблеми. Титанові руди включено до затвердженого Радою національної безпеки і оборони України переліку корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки й обороноздатності України. Мінерально-сировинна база титану України достатньо розвинена і перспективна в конкурентній боротьбі на світовому ринку. Межирічне родовище, розташоване у Волинському мегаблоці Українського щита (Житомирська обл.), нині має стратегічне промислове значення для титанової галузі України й водночас є цінним науковим полігоном для дослідження процесів екзогенного рудоутворення в породах різного віку й генезису.

Основним титановмісним мінералом є ільменіт, який за природних умов зазнає змін різного ступеня. Окрім первинного магматичного ільменіту, в алювіальних відкладах поширені його похідні – псевдуритил і лейкоксенізований ільменіт, які утворюються внаслідок вилуговування з мінералу заліза й збагачення титаном.

Необхідність дослідження хімічного складу ільменіту в розсипах зумовлена тим, що хімічний склад ільменіту відображає умови його утворення і трансформацію в системі корінні породи–кора звітрювання–алювіальні відклади, визначає його придатність для виробництва пігментів, металевого титану, феросплавів тощо. Діагностування трансформаційних форм ільменіту й картографування просторового поширення різних відмін мінералу в алювіальних пісках нижньої крейди Ємилівської й Середньої ділянок Межирічного родовища мають наукову і практичну значимість, оскільки дають змогу поєднати якісні характеристики мінералу з просторово-статистичними закономірностями їх розподілу.

Аналіз досліджень. Межирічне родовище ільменіту як поховане розсипне родовище було відкрито 1954 р. під час буріння трьох магістральних ліній у межиріччі Ірша–Тростяниця. Протягом 1971–1975 рр. геологи Іршанського гірничо-збагачувального комбінату провадили геологорозвідувальні роботи на Середній та Ємилівській ділянках родовища. У 1988–1989 рр. виконано дорозвідку й технологічне картування, уточнено геологічну будову та визначено технологічні характеристики ільменітоносних пісків на зазначених ділянках. Експлуатацію Межирічного родовища почали 2001 р. з розробки Ємилівської ділянки, а 2003 р. почали розробляти ділянку Середня. У 2017–2018 рр. виконано повторну геолого-економічну оцінку запасів на ділянках Середня, Ємилівська, Юрська, Осінова і Букинська, що дало змогу схарактеризувати геологічну будову родовища, морфологію рудних тіл, речовинний склад і технологічні властивості руд, а також оцінити гідргеологічні, інженерно–геологічні й гірничотехнічні умови розробки. За результатами повторної геолого-економічної оцінки залишку всіх виявлених запасів корисних копалин Межирічного родовища в межах ділянок Ємилівська й Середня підраховано балансові (категорія В) і позабалансові (категорії В, C_1 , $V+C_1$) запаси.

У 2022–2025 рр. Л. Фігура та М. Ковальчук дослідили рудоносність кори звітрювання, крейдових (апт–нижній альб, турон) і палеоген–четвертинних відкладів Осінової, Букинської, Юрської та Ємилівської ділянок, завдяки чому було створено комплект картографічних матеріалів, що відображають просторовий розподіл ільменіту в зазначених відкладах [7]. У 2025 р. О. Ганжа з колегами стисло схарактеризувала особливості геологічної будови й рудоносність кори звітрювання та продуктивного пласта в межах окремих ділянок родовища (Осінова, Юрська, Середня, Ємилівська, Ісаківська, Південна, Рихтинська, Букинська). Дослідники представили зведені дані щодо гіпсометрії підосви, покрівлі, товщини пластів та середньої концентрації ільменіту для шести ділянок, у тім числі Ємилівської й Середньої.

Від початку розробки родовища триває дослідження якості сировини, зокрема, хімічного складу ільменіту. Однак поза увагою науковців залишилася низка важливих аспектів, як-от варіативність хімічного складу ільменіту, трансформаційні різновиди мінералу,

сформовані за екзогенних умов, просторовий розподіл по-різному змінених зерен ільменіту та ін. Пропонована публікація частково компенсує цю наукову прогалину. Нижче наведено результати комплексного дослідження хімічного складу ільменіту з продуктивних піщаних утворень нижньої крейди в межах ділянок Ємилівська та Середня. Вибір ділянок зумовлений їхнім розташуванням у верхів'ї ранньокрейдової палеодолини, що дає змогу простежити трансформацію хімічного складу ільменіту вниз за палеотечею давньої річкової системи – від Ємилівської ділянки до Середньої.

Основою досліджень є наші напрацювання щодо рудоносності елювіальних і розсипних родовищ ільменіту й картографування просторового поширення ільменіту різного хімічного складу [2–5], а також наукові публікації стосовно змін магматичного ільменіту за екзогенних умов з виокремленням його вторинних відмін – псевдуриту, лейкоксенованого ільменіту, лейкоксену [10; 13]. Фактичним матеріалом слугували результати хімічного аналізу ільменіту, виконані в різні роки виробничими геологічними організаціями. Для визначення взаємозв'язку між оксидами в ільменіті використано статистичні методи кореляції Пірсона, для картування просторового розподілу ільменіту – програмне забезпечення Golden Software Surfer, для з'ясування просторової неоднорідності розсипів на ділянках – фрактальний метод [1] і програмне забезпечення Python 3.11.8.

Метою дослідження є аналіз хімічного складу ільменіту з двох ділянок Межирічного родовища – Ємилівської й Середньої, з'ясування кореляційних зв'язків між оксидами, визначення ступеня зміни ільменітових зерен з виокремленням магматичного ільменіту, псевдуриту та лейкоксенованого ільменіту і просторового поширення цих відмін.

Виклад основного матеріалу. Ємилівська ділянка розташована в південно-західній частині Межирічного родовища і безпосередньо прилягає до західної околиці с. Ємилівка (Коростенський р-н); ділянка Середня є продовженням Ємилівської за палеотечею ранньокрейдової палеодолини і розташована за 0,3 км від північної околиці цього села (рис. 1). У геологічній будові обох ділянок беруть участь докембрійські породи кристалічного фундаменту, кора звітрювання з чіткою вертикальною зональністю, продуктивні континентальні відклади іршанської світи K_1 , узбережно-морські відклади мошно-руднянської світи K_2 і палеоген-четвертинні утворення. Серед магматичних порід переважають анортозити й габро-анортозити, менше розвинені габро, габронорити тощо [7].

Первинні рудні тіла з різним вмістом ільменіту були приурочені до анортозитів, габро-анортозитів та інших різновидів габро. Процеси звітрювання спричинили вивільнення ільменіту з кристалічних порід та утворення рудних тіл у корі звітрювання (здебільшого вони є продовженням рудних тіл фундаменту). Подальші процеси розмивання й перевідкладання елювію призвели до утворення континентальних відкладів іршанської світи, які нині виповнюють давню поховану річкову палеодолину в корі звітрювання й містять промислові концентрації ільменіту. За результатами досліджень Н. Нестеренко (2018), на ділянках Ємилівська та Середня зафіксовано такий вміст ільменіту, кг/м³: у корі звітрювання – 446,3 та 265,6, відповідно; у делювіальних гравійно-галькових піщанистих каолінах – 291,3 та 461,6, в алювіальних перевідкладених каолінах – 45,1 та 426,9, в алювіальних різнозернистих пісках – 666,6 та 356,7 (іршанська світа); у піщано-кремневою горизонті мошно-руднянської світи – 41,5 та 244,6, відповідно.

Простежується значна варіативність вмісту ільменіту залежно від літологічного типу порід, їхнього генезису й віку, що підтверджує складну просторову структуру розподілу мінералу у стратиграфічному розрізі обох ділянок. Продуктивними утвореннями є відклади іршанської світи нижньої крейди (апг–нижній альб). Літологічно це гравійно-галькові піщанисті каоліни, перевідкладені каоліни й різнозернисті каолінисті піски.

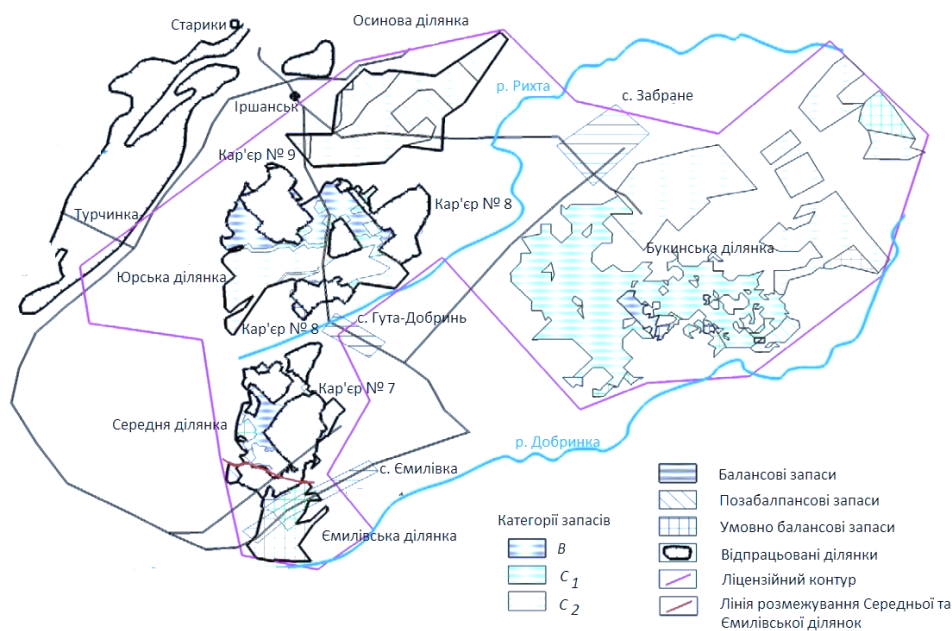


Рис. 1. Схема розташування ділянок Ємилівська і Середня в межах Межирічного родовища, за Т. Нестеренко (2018)

Ми досліджували хімічний склад ільменіту з піщаних утворень іршанської світи. Піщаним відкладом притаманний невитриманий гранулометричний склад; шаруватість слабка, або ж її просто нема, іноді трапляється коса шаруватість. Ступінь сортування зерен поганий, або ж відклади взагалі несортвані. Товщина піщаних відкладів на ділянці Ємилівська становить 1,3–21,0 м (середнє значення – 11,99 м), на ділянці Середня – 0,5–29,5 м (12,13 м).

Понад 90 % зерен ільменіту сконцентровані в класі крупності $-1,0+0,1$ мм, найбільше – у класі $-0,5+0,1$ мм. Розмір зерен становить головню 0,30–0,56 мм (середнє значення – 0,44 мм). Найбагатші розсили пов'язані з різнозернистими пісками. Колір ільменіту залізо-чорний, часто з темно-коричневим відтінком.

Хімічним аналізом в ільменіті з пісків Ємилівської ділянки визначено такі оксиди, %: TiO_2 – 53,20–56,92 (середнє значення – 55,43); Cr_2O_3 – 0,024–0,031 (0,028); Fe_2O_3 – 10,98–16,97 (14,47); FeO – 23,03–32,04 (25,71); MnO – 0,50–0,87 (0,64); V_2O_5 – 0,179–0,237 (0,207); P_2O_5 – 0,029–0,134 (0,086). Співвідношення FeO/Fe_2O_3 становить 1,35–2,91 (1,74), що засвідчує наявність майже незміненого і слабо зміненого мінералу. У більшості свердловин наявний ільменіт з $FeO/Fe_2O_3 = 1,5–1,9$. У табл. 1 наведено результати кореляційного аналізу хімічного складу ільменіту Ємилівської ділянки.

Як видно з табл. 1, обернені сильні кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO_2 і FeO та між FeO і Fe_2O_3 . Прямі середньої сили кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO_2 і P_2O_5 , FeO і MnO , Fe_2O_3 і Cr_2O_3 , обернений середньої сили – між TiO_2 і MnO . Прямі помірні кореляційні зв'язки наявні між TiO_2 і Fe_2O_3 , FeO і V_2O_5 , обернені помірні – між FeO і Cr_2O_3 , Fe_2O_3 і V_2O_5 , Fe_2O_3 і P_2O_5 , Fe_2O_3 і MnO . Прямі слабкі кореляційні зв'язки наявні між P_2O_5 і V_2O_5 , Cr_2O_3 і V_2O_5 , обернені слабкі – між P_2O_5 і MnO , P_2O_5 і Cr_2O_3 , FeO

Таблиця 1

Матриця кореляційних коефіцієнтів між оксидами в ільменіті з Ємлівської ділянки

Оксиди	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅
TiO ₂	X	-0,84	+0,44	-0,61	+0,17	–	+0,53
FeO	-0,84	X	-0,79	+0,56	-0,45	+0,37	-0,22
Fe ₂ O ₃	+0,44	-0,79	X	-0,42	+0,54	-0,44	-0,34
MnO	-0,61	+0,56	-0,42	X	–	–	-0,28
Cr ₂ O ₃	+0,17	-0,45	+0,54	–	X	+0,23	-0,20
V ₂ O ₅	–	+0,37	-0,44	–	+0,23	X	+0,28
P ₂ O ₅	+0,53	-0,22	-0,34	-0,28	-0,20	+0,28	X

і P₂O₅. Прямий дуже слабкий кореляційний зв'язок наявний між TiO₂ і Cr₂O₃, обернений дуже слабкий – між TiO₂ і V₂O₅. Між MnO і Cr₂O₃ та MnO і V₂O₅ кореляційного зв'язку не виявлено. Сильні обернені зв'язки відображають внутрішню структуру мінералу, середні й помірні – наявність домішкових включень, слабкі – випадкові асоціації, а відсутність кореляції – незалежність елементів.

У хімічному складі ільменіту ділянки Середня діагностовано такі оксиди, %: TiO₂ – 52,53–60,02 (середнє значення – 54,99); Cr₂O₃ – 0,01–0,05 (0,03); Fe₂O₃ – 11,38–20,95 (15,15); FeO – 15,29–32,70 (26,12); MnO – 0,50–0,86 (0,62); V₂O₅ – 0,20–0,25 (0,22); P₂O₅ – 0,03–0,19 (0,08). Співвідношення FeO/Fe₂O₃ становить 0,79–2,85 (1,75), що свідчить про наявність незміненого, слабо зміненого і сильно зміненого мінералу. У більшості свердловин виявлено ільменіт з FeO/Fe₂O₃ = 1,3–1,9. У табл. 2 наведено результати кореляційного аналізу хімічного складу ільменіту ділянки Середня.

Таблиця 2

Матриця кореляційних коефіцієнтів між оксидами в ільменіті з ділянки Середня

Оксиди	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅
TiO ₂	X	-0,89	+0,73	–	+0,48	+0,10	+0,74
FeO	-0,89	X	-0,91	-0,13	-0,50	–	-0,70
Fe ₂ O ₃	+0,73	-0,91	X	+0,18	+0,39	–	+0,55
MnO	–	-0,13	+0,18	X	–	-0,45	+0,10
Cr ₂ O ₃	+0,48	-0,50	+0,39	–	X	-0,10	+0,22
V ₂ O ₅	+0,10	–	–	-0,45	-0,10	X	+0,15
P ₂ O ₅	+0,74	-0,70	+0,55	+0,10	+0,22	+0,15	X

Як видно з табл. 2, обернені сильні кореляційні зв'язки наявні між вмістом TiO₂ і FeO, FeO і Fe₂O₃, FeO і P₂O₅, прямі сильні – між TiO₂ і P₂O₅, TiO₂ і Fe₂O₃. Прямий середньої сили кореляційний зв'язок наявний між Fe₂O₃ і P₂O₅, обернений – між FeO і Cr₂O₃. Прямі помірні кореляційні зв'язки наявні між TiO₂ і Cr₂O₃, Fe₂O₃ і Cr₂O₃, обернені помірні – між V₂O₅ і MnO. Прямий слабкий кореляційний зв'язок наявний між P₂O₅ і Cr₂O₃. Прямі дуже слабкі кореляційні зв'язки зафіксовано між Fe₂O₃ і MnO, P₂O₅ і V₂O₅, TiO₂ і V₂O₅, P₂O₅ і MnO, обернені слабкі – між FeO і MnO, Cr₂O₃ і V₂O₅. Кореляційного зв'язку між вмістом TiO₂ і MnO, FeO і V₂O₅, Fe₂O₃ і V₂O₅, Cr₂O₃ і MnO не виявлено.

Латеральне поширення ільменіту різного хімічного складу на ділянці Ємилівська показано на рис. 2. Отже, ільменіт з найвищим умістом TiO_2 поширений у північно-західній і південно-східній частинах ділянки, а з найнижчим – у північно-східній і південно-західній, з найвищим умістом FeO – на півдні ділянки, а з найнижчим – у північно-західній і південно-східній частинах. Найменше Fe_2O_3 в ільменіті на заході ділянки. Найбільші значення співвідношення FeO/Fe_2O_3 в ільменіті (тобто ільменіт найменше змінений екзогенними процесами) притаманні мінералу з південно-східної частини ділянки. Ільменіт з найвищим умістом P_2O_5 і V_2O_5 поширений у північно-західній і південно-східній частинах ділянки, з найбільшим вмістом MnO – у південній частині, а Cr_2O_3 – у північній (див. рис. 2).

На ділянці Середня латеральне поширення ільменіту різного складу плямисте (рис. 3), що свідчить про складніший просторовий розподіл мінералу порівняно з ділянкою Ємилівська. Однак є певні закономірності, зокрема, ареал ільменіту з найвищим вмістом TiO_2 і Fe_2O_3 розташований у західній частині ділянки. Просторово йому відповідає ареал ільменіту з найнижчим умістом FeO . Ільменіт з найвищим умістом MnO поширений у східній частині ділянки (див. рис. 3).

На підставі наявних даних [6; 8; 10–13], хімічного складу ільменіту з піщаних відкладів та співвідношення в ньому FeO/Fe_2O_3 виокремлено магматичний ільменіт та продукти його зміни. Головним індикатором ступеня змінності розсипного ільменіту за екзогенних умов є співвідношення FeO/Fe_2O_3 , яке відображає баланс між відновленою та окисненою формами заліза. Ми застосували два методи: перший ґрунтується на співвідношенні FeO/Fe_2O_3 в ільменіті, другий – на цьому співвідношенні та абсолютних значеннях FeO і Fe_2O_3 . Перевагами першого методу є простота, відтворюваність, можливість застосування на різних ділянках без додаткових параметрів, а недоліком – відсутність чутливості до локальних хімічних відмінностей мінералу та можливість хибної інтерпретації в разі близьких значень співвідношення. Однак, незважаючи на це, співвідношення FeO/Fe_2O_3 є ключовим індикатором стадії зміни ільменіту. На підставі цього методу в межах ділянок Ємилівська й Середня в піщаних відкладах виокремлено магматичний ільменіт (значення $FeO/Fe_2O_3 > 1,6$), псевдуритил (1,6–1,2) і лейкоксенізований ільменіт ($< 1,2$). Отже, на Ємилівській ділянці магматичний ільменіт становить 63,64 %, а псевдуритил – 36,36 %; на ділянці Середня магматичний ільменіт становить 69,40 %, псевдуритил – 24,48, лейкоксенізований ільменіт – 6,12 %.

У процесі застосування другого методу використано такі критерії: для магматичного ільменіту – $FeO/Fe_2O_3 > 1,6$, $FeO > 25$ %, $Fe_2O_3 < 15$ %, для псевдуритилу – відповідно, 1,2–1,6, 22–25 %, 15–18 %, для лейкоксенізованого ільменіту – $< 1,2$, < 22 %, > 18 %. Високий вміст FeO відповідає магматичному ільменіту, збільшення кількості Fe_2O_3 свідчить про зміни мінералу. Зазначимо, що цей метод продемонстрував вищу точність діагностики, передусім, для змінених форм. Зокрема, на Ємилівській ділянці першим методом частину зерен діагностовано як псевдуритил, а за другим методом – як лейкоксенізований ільменіт. Відповідно до описаних критеріїв, у межах Ємилівської ділянки магматичний ільменіт становить 54,55 %, псевдуритил – 27,27, а лейкоксенізований ільменіт – 18,18 %, на ділянці Середня, відповідно, – 77,56, 16,32 і 6,12 %.

Для оцінки просторової неоднорідності розсипищ використано фрактальний метод, який дає змогу описати складний, нерегулярний розподіл ільменіту і його змінених форм через фрактальну розмірність D . Для магматичного ільменіту та продуктів його зміни визначено таку фрактальну розмірність $D_{\text{арргох}}$: магматичний ільменіт – 1,7–1,9, псевдуритил – 1,3–1,5, лейкоксенізований ільменіт – 1,1–1,3. Отже, для магматичного ільменіту характерні кластеризовані поля й порівняно рівномірний просторовий розподіл;

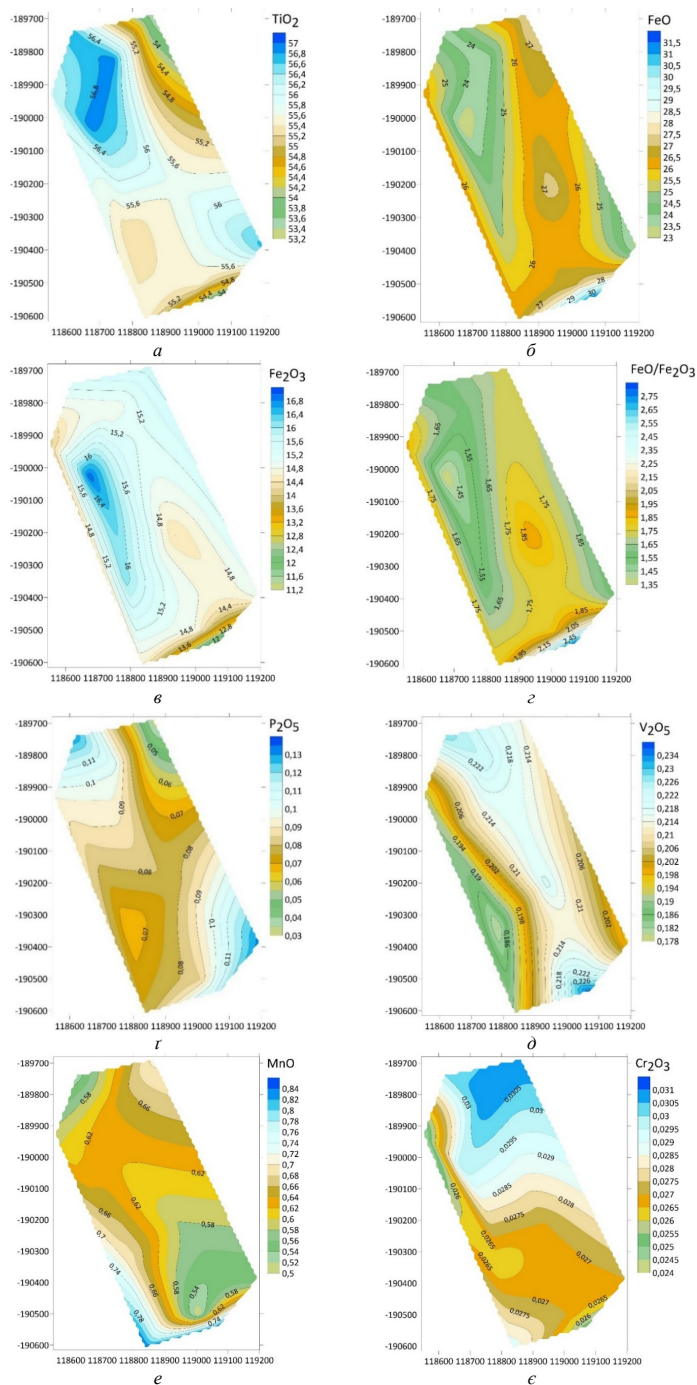


Рис. 2. Латеральне поширення ільменіту різного складу на Ємилівській ділянці
(вміст оксидів у відсотках):
а – TiO_2 ; б – FeO; в – Fe_2O_3 ; г – FeO/Fe_2O_3 ; р – P_2O_5 ; д – V_2O_5 ; е – MnO; є – Cr_2O_3

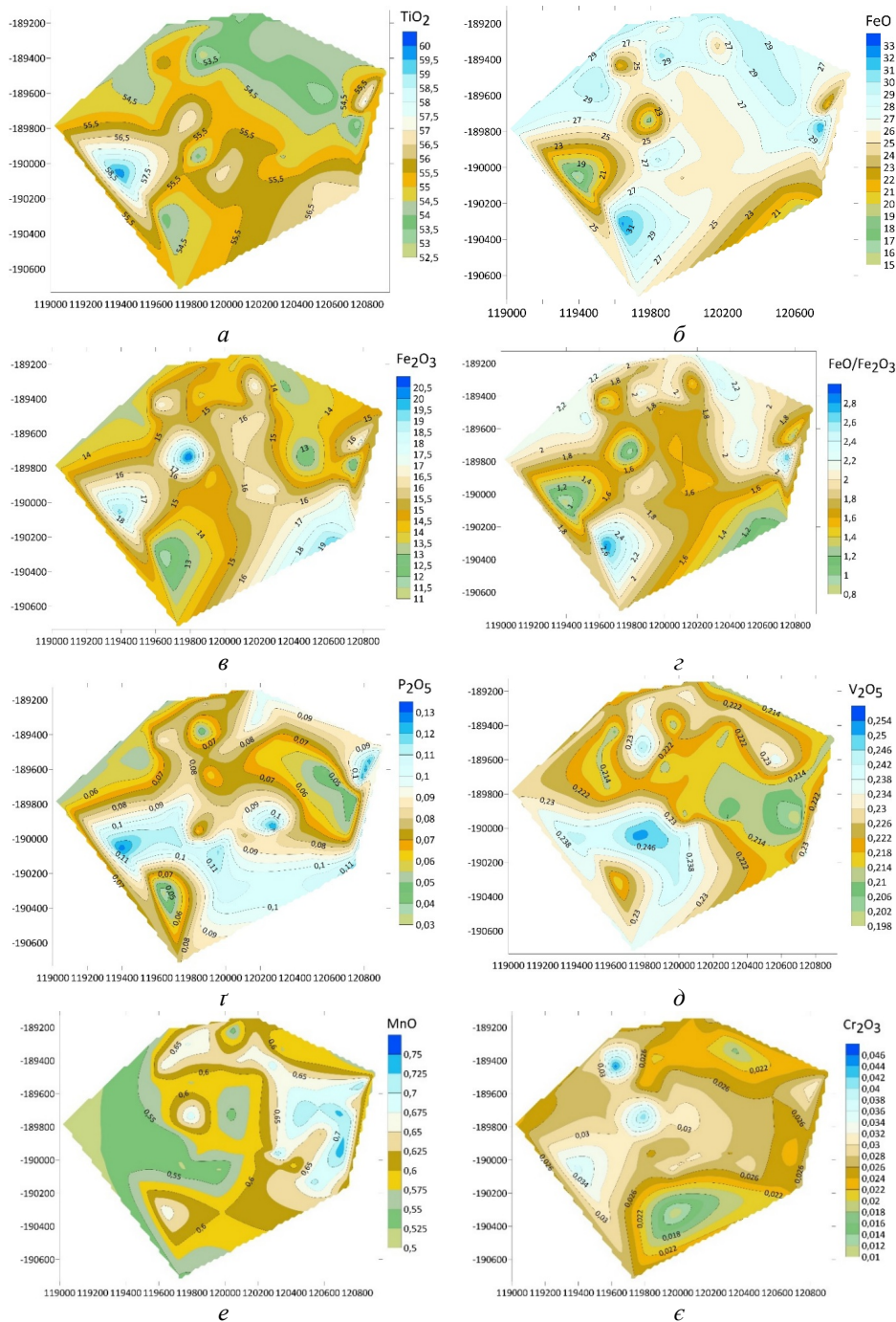


Рис. 3. Латеральне поширення ільменіту різного складу на ділянці Середня (вміст оксидів у відсотках):
 а – TiO_2 ; б – FeO ; в – Fe_2O_3 ; г – FeO/Fe_2O_3 ; д – V_2O_5 ; е – MnO ; є – Cr_2O_3

псевдуритил має дисперсний розподіл у локальних зонах; лейкоксенізований ільменіт сконцентрований у піщаних відкладах, причому його зерна розподілені випадково й нерівномірно. Просторове картографування поширення ільменіту та його змінених різновидів на ділянці Середня добре узгоджується з просторовим поширенням ільменіту, у якому є різне співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 4).

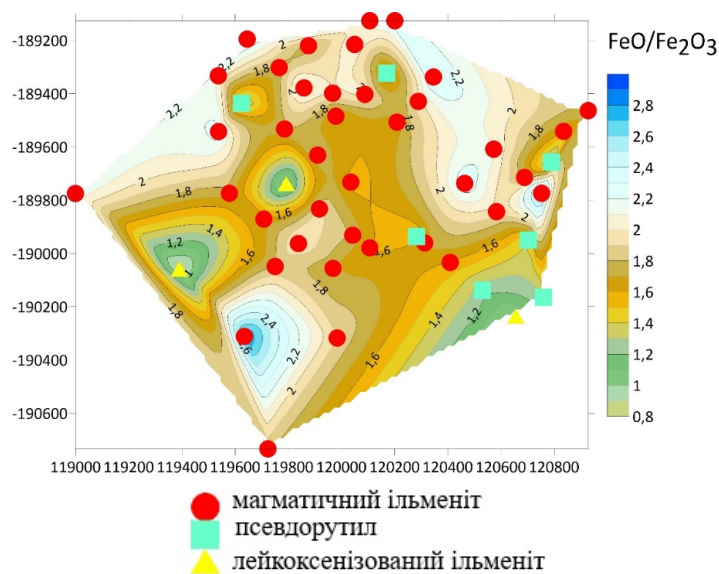


Рис. 4. Карта просторового поширення ільменіту з різним співвідношенням $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, суміщена з картою просторового поширення магматичного ільменіту та змінених його відмін, ділянка Середня

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз хімічного складу ільменіту з піщаних відкладів ділянок Смилівська і Середня Межирічного родовища засвідчив, що ільменіт Смилівської ділянки має стабільний склад, натомість в ільменіті з ділянки Середня зафіксовано ширший діапазон хімічних параметрів, включно з підвищеним вмістом TiO_2 та варіативним співвідношенням $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, ширшим діапазоном мінімальних і максимальних значень вмісту FeO . Вміст P_2O_5 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , MnO загалом подібний, проте на ділянці Середня вміст MnO дещо нижчий, а максимальний вміст Cr_2O_3 дещо більший. На цій же ділянці співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в ільменіті менше від одиниці, що свідчить про наявність більш окисненого ільменіту. Зменшення співвідношення $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ свідчить про інтенсивність екзогенних перетворень мінералу та зміну його фізико-хімічних властивостей, які впливають на технологічні підходи до збагачення [9].

Порівняльний аналіз напряму і сили кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті на досліджених ділянках засвідчив як спільні, так і контрастні тенденції. Ільменіту Смилівської ділянки притаманна збалансованіша система кореляційних зв'язків між оксидами, тоді як ільменіту ділянки Середня – більш поляризована й інтенсивно диференційована.

За допомогою двох методів на ділянках виокремлено магматичний ільменіт, псевдуритил і лейкоксенізований ільменіт, визначено їхній відсотковий вміст у відкладах. Це має важливе геологічне й промислове значення, оскільки відображає стадії екзогенного перетворення мінералу та визначає його якість як рудної сировини.

Просторове картографування ареалів поширення незміненого й по-різному перетвореного ільменіту є інструментом для реконструкції умов формування розсипищ, промислової оцінки ділянок, виявлення ареалів поширення руд вищої якості. За допомогою таких карт можна оптимізувати гірничі роботи, зосереджуючи їх на ділянках з найціннішою сировиною.

Фрактальний аналіз просторового розподілу магматичного ільменіту, псевдуриту і лейкоксенованого ільменіту на Ємилівській та Середній ділянках засвідчив чітку диференціацію їхніх фрактальних розмірностей. Магматичний ільменіт характеризується порівняно високими значеннями фрактальної розмірності, що відображає кластеризовані поля і збереження елементів первинної магматичної структури навіть у розсипищі. Псевдурит демонструє середні значення цього показника, які відповідають більш дисперсному розподілу зерен, що утворилися внаслідок гіпергенезу в корі звітрювання й були перевідкладені в алювії. Лейкоксенований ільменіт має найнижчі значення фрактальної розмірності, що свідчить про ізольовані прояви та випадковий розподіл його зерен у піщаних відкладах.

Отже, умови формування розсипищ і екзогенної трансформації ільменіту в межах досліджених ділянок були подібні за загальними тенденціями, проте локально відрізнялися за інтенсивністю процесів та структурною неоднорідністю.

Результати дослідження ільменіту з ділянок Ємилівська та Середня засвідчують варіативність хімічного складу мінералу, що відображає як первинні магматичні особливості, так і вторинні зміни. Це узгоджується з результатами зарубіжних науковців [10], які описують універсальну послідовність змін ільменіту за континентальних умов, супроводжувану вилуговуванням заліза та збагаченням титаном: ільменіт → псевдурит → лейкоксен. Китайські вчені досліджували звітрювання ільменіту в районі Гуансі (Guangxi) і дійшли висновку, що утворення псевдуриту й лейкоксену створює умови для сумісної мінералізації з рідкісноземельними елементами [13]. Ми виявили на Межирічному родовищі псевдурит і лейкоксенований ільменіт, що узгоджується з моделлю [13] і може вказувати на ймовірну рідкісноземельну мінералізацію на ділянках поширення цих змінених відмін ільменіту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на застосування високоточних методів мікроаналізу (SEM – сканувальна електронна мікроскопія, EPMA – електронно-зондовий мікроаналіз, LA-ICP-MS – метод лазерної абляції з індуктивно-зв'язаною плазмою і мас-спектрометрією) для деталізації процесів псевдуритизації й лейкоксенізації та дослідження наявності рідкісноземельних елементів у змінених різновидах ільменіту, а також на розвиток фрактального моделювання як інструмента кількісної оцінки неоднорідності й прогнозування просторових меж ільменітовмісних тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білоус О. І., Парфенюк В. О., Безвинний В. П., Слободян Б. І. Застосування фрактального аналізу для кількісної оцінки родовищ критичної мінеральної сировини (на прикладі Полохівського родовища літію). *Мінеральні ресурси України*, 2024. № 3. С. 4–9. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.10-15>
2. Ковальчук М., Фігура Л. Ільменітоносність продуктивних відкладів та якісні параметри ільменіту Тростяницького родовища титанових руд. *Мінералогічний збірник*. 2025. № 74. С. 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03>
3. Ковальчук М. С., Крошко Ю. В. Ільменіт з нижньокрейдових континентальних відкладів Андріївського розсипного родовища титанових руд. *Слобожанський науковий вісник. Серія Природничі науки*. 2025. Вип 2. С. 143–150. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.19>

4. Крошко Ю. В., Ковальчук М. С. Ільменіт з кори вивітрювання та нижньокрейдових відкладів Бирзулівського родовища титанових руд. *Мінералогічний журнал*. 2025. Т. 47. № 3. С. 110–124. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.03.110>
5. Крошко Ю. В., Ковальчук М. С. Рудоносність Аврамівського і Західного родовищ (Новомиргородський габро-анортозитовий масив). *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 1. С. 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49>
6. Полетньова О. В. Геохімічні особливості ільменіту з кори вивітрювання та алювіальних розсипів Українського щита. *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 4. С. 35–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.35-40>
7. Фігура Л., Ковальчук М. Рудоносність Ємилівської ділянки Межирічного родовища титанових руд. *Вісник Львівського університету. Серія геологічна*. 2025. Вип. 39. С. 189–204. <https://doi.org/10.30970/vgl.39.15>
8. Харитонов В. М., Харитонов Д. В. Особливості хімічного складу ільменіту Малишевського кайнозойського родовища та деяких докембрійських порід Українського щита. *Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність. Матеріали міжнар. наук. конф. Київ: Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка, 2020. С. 224–226.*
9. Akbar M., Irannejad M., Rezaei B. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effect on physical and surface properties. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 70. P. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.002>
10. BenchChem Technical Support Team. Ilmenite weathering and alteration in continental settings: chemical changes and placer concentration. *Foundational & Exploratory*. 2026. 1198. URL:https://pdf.benchchem.com/1198/Ilmenite_weathering_processes_and_alteration_products.pdf (access date 20/03/2026).
11. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An introduction to the rock-forming minerals. 2nd ed. London: Longman Scientific & Technical, 1992. 696 p.
12. Force E. R. Geology of titanium-mineral deposits. Geological Society of America, Spec. Paper 282. Boulder: GSA, 1991. 112 p. <https://doi.org/10.1130/SPE259>
13. Luo P., Fu W., Guo X., Lu H., Chai M., Hu M., Lu J., Wang X., Xu C. Weathering co-mineralization of placer type ilmenite and ion-adsorption type rare earth elements in Guangxi, China: Nature, origin and exploration implications. *Ore Geology Reviews*. 2023. Vol. 163. Art. 105815. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105815>

REFERENCES

1. Bilous, O. I., Parfeniuk, V. O., Bezvynnyi, V. P., & Slobodian, B. I. (2024). Zastosuvannya fraktalnogo analizu dlia kilkisnoi otsinky rodovyshch krytychnoi mineralnoi syrovyny (na prykladi Polokhivskoho rodovyshcha litiuu) [Application of fractal analysis for quantitative assessment of critical mineral commodities (on example of Polokhivske lithium deposit)]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 3, 4–9. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.10-15>
2. Kovalchuk, M., & Figura, L. (2024). Ilmenitonosnist produktyvnykh vidkladiv ta yakisni parametry ilmenitu Trostianytskoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite-bearing capacity of productive sediments and quality parameters of ilmenite of the Trostianytske titanium ore deposit]. *Mineralohichnyi zbirnyk – Mineralogical Collection*, 74, 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03>
3. Kovalchuk, M. S., & Kroshko, Yu. V. (2025). Ilmenit z nyzhnokreidovykh kontynentalnykh vidkladiv Andriivskoho rozsypnogo rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite from the lower cretaceous continental deposits of the Andriivsky placer deposit of titanium ores]. *Slobozhanskyi naukovyi visnyk. Seriya Pryrodnychi nauky – Sloboda Scientific journal. Natural Sciences*, 2, 143–150. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.19>

4. Kovalchuk, M. S., & Kroshko, Yu. V. (2025). Ilmenit z kory vyvitriuvannya ta nyzhnokreidovykh vidkladiv Byrzulivskoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ilmenite from weathering crust and lower cretaceous sediments of the Byrzulivske titanium ore deposit]. *Mineralohichnyi zhurnal – Mineralogical Journal*, 47 (3), 110–124. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.03.110>
5. Kroshko, Y. V., & Kovalchuk, M. S. (2025). Rudonosnist Avramivskoho i Zakhidnoho rodovyshch (Novomyrhorodskiyi habro-anortozytoviyi masyv) [Ore content of Avramivske and Zakhidne deposits (Novomyrhorod gabbro-anorthosite massif)]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 1, 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49>
6. Polietnova, A. O. (2025). Heokhimichni osoblyvosti ilmenitu z kory vyvitriuvannya ta aliuvialnykh rozsyipiv Ukrainskoho shchyta [Chemical composition as an indicator of ilmenite genesis and titanium raw material quality]. *Mineralni Resursy Ukrainy – Mineral Resources of Ukraine*, 4, 35–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.35-40>
7. Figura, L., & Kovalchuk, M. (2025). Rudonosnist Yemylivskoi dilianky Mezhyrichnoho rodovyshcha tytanovykh rud [Ore capacity of the Emylivska section of the Mezhyrichny titanium ore deposit] *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya heolohichna – Vishyk of the Lviv University. Series Geology*, 39, 189–204. <https://doi.org/10.30970/vgl.39.15>
8. Kharitonov, V. M., & Kharitonov, D. V. (2020). Osoblyvosti khimichnoho skladu ilmenitu Malyshevskoho kainozoiskoho rodovyshcha ta deiakykh dokembriiskyykh porid Ukrainskoho shchyta [Features of the chemical composition of ilmenite of the Malyshevskoe Cenozoic deposit and some Precambrian rocks of the Ukrainian shield]. In *Precambrian: rock associations and their ore mineralization. Abstract of Intern. Sci. Conf.* (pp. 224–226). Kyiv: NAS of Ukraine, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation.
9. Akbar, M., Irannejad, M., & Rezaei, B. (2015). Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effect on physical and surface properties. *Minerals Engineering*, 70, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.002>
10. BenchChem Technical Support Team (2026). Ilmenite weathering and alteration in continental settings: chemical changes and placer concentration. *Foundational & Exploratory*. 1198. URL:https://pdf.benchchem.com/1198/Ilmenite_weathering_processes_and_alteration_products.pdf (access date 20/03/2026).
11. Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the rock-forming minerals*. 2nd Ed. London: Longman Scientific & Technical.
12. Force, E. R. (1991). *Geology of titanium-mineral deposits*. Geol. Soc. of America. Spec. Paper 282. Boulder: GSA. <https://doi.org/10.1130/SPE259>
13. Luo, P., Fu, W., Guo, X., Lu, H., Chai, M., Hu, M., Lu, J., Wang, X., & Xu, C. (2023). Weathering co-mineralization of placer type ilmenite and ion-adsorption type rare earth elements in Guangxi, China: Nature, origin and exploration implications. *Ore Geology Reviews*, 163, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105815>

CHEMICAL COMPOSITION AND LATERAL DISTRIBUTION OF ILMENITE AND ITS ALTERED VARIETIES IN THE SITES OF YEMLIVSKA AND SEREDNIA OF THE MEZHRYCHNE TITANIUM DEPOSIT (ZHYTOMYR REGION)

Myron Kovalchuk, Liubov Figura
kms1964@ukr.net; liuba_figura@ukr.net

*Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,
55b, Olesia Honchara St., Kyiv, Ukraine, 01601*

The chemical composition of ilmenite from Lower Cretaceous alluvial kaolin sands of the Irshanska suite in the Yemylivska and Serednia sites of the Mezhyrichne titanium ore deposit (Volynskyi megablock of the Ukrainian Shield) was studied. This made it possible to identify its variations in different areas and perform a comparative analysis. Correlation analysis determined the direction and strength of correlations between oxides in ilmenite, as well as common patterns and significant differences in the relationships between oxides. The strong negative correlation between FeO and Fe₂O₃ and the positive one between TiO₂ and Fe₂O₃ reflects the balance between the reduced and oxidized forms of iron in ilmenite.

Two approaches were used to separate magmatic ilmenite, pseudorutile, and leucoxened ilmenite: (1) by the FeO/Fe₂O₃ ratio, which allows for rapid classification of grains; (2) by combining the specified ratio with absolute concentrations of FeO and Fe₂O₃, which provides a more accurate interpretation. Thanks to this approach, the presence of both primary magmatic ilmenite and its altered varieties formed under exogenous conditions was confirmed. A comparative analysis of the processes of pseudorutilization and leucoxenization of ilmenite within the Yemylivska and Serednia sites was performed.

Fractal analysis of the spatial distribution of magmatic ilmenite and its altered varieties showed that their distribution has signs of self-similarity and structural organization, which reflects natural processes of differentiation and secondary alteration.

Cartographic modelling of the distribution areas of ilmenite of different chemical composition and with different FeO/Fe₂O₃ ratios was performed, which makes it possible to determine the degree of exogenous transformation, predict the distribution areas of ilmenite with different qualitative characteristics, reconstruct the conditions of placer formation, and optimize the industrial development of residual reserves within the studied areas. The proposed comprehensive model integrates chemical, mineralogical, and spatial data, providing a deeper understanding of the genesis of ilmenite placers, their chemical zoning, and potential for industrial development.

Key words: ilmenite, pseudorutile, leucoxenization, chemical composition, alteration, placer, lateral distribution, correlation analysis, mapping, Mezhyrichne deposit, Ukrainian Shield.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026