

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-383-391](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-383-391)
УДК 622.1

М.С. Куницька, ст. викладач
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.
М.А. Скорик, аспірант
М.В. Павлюченко, гірничий інженер
Державний університет «Житомирська політехніка»
Ю.О. Заболотна, к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Геометризація просторового розподілу шкідливих та корисних елементів в умовах Злобицького родовища ільменіту

Геометризація родовища полягає в зборі, систематизації та використанні методів статистики для аналізу та встановлення взаємозв'язків між різними характеристиками твердих корисних копалин. Цей підхід дозволяє краще розуміти умови видобутку та подальшої обробки мінеральної сировини шляхом графічного відображення інформації. Розглядаються такі аспекти, як розташування покладів, їхні розміри, форма, будова, склад корисних копалин та гірничо-геологічні умови видобутку.

Дослідження просторового розподілу шкідливих та корисних елементів дозволяє краще розуміти геохімічні процеси, що відбуваються в земній корі, а також прогнозувати якість руди та визначити можливість її використання для промислових цілей. Основним результатом досліджень є створення комплексних моделей розсипів, які допомагають уточнити структуру та умови утворення покладу, виявити умовні і малопродуктивні ділянки. Було встановлено зв'язок між розподілом ільменіту та товщиною вентиляційної кори.

У результаті надано дані для визначення оптимальних напрямків видобутку та виділено зони мінералізації.

Ключові слова: геометризація; титан; ільменіт; Злобицьке родовище.

Актуальність теми. Вибір способу розробки родовища, обґрунтування основних технологічних параметрів і встановлення раціональних характеристик технологічного комплексу для видобування титановмісних пісків переважно ґрунтуються на інформації про їх геологічну будову [11]. При цьому особливу увагу звертають на: потужність покладу в межах окремих ділянок, вміст корисних та шкідливих компонентів, закономірність їх розвитку. Кількісні та якісні показники мають забезпечувати достовірну інформацію про геологічну будову ільменітових покладів та характеризувати їх динаміку в просторі родовища, а обрані методи дослідження за допомогою простих операцій забезпечувати змогу отримання моделі родовища або окремих його технологічних ділянок. Якість мінеральної сировини суттєво залежить від хімічних, фізичних і технологічних властивостей, що в сукупності з гірничо-геологічними умовами залягання покладів визначає промислову цінність родовища [11]. Проаналізувати та систематизувати названі вище показники можливо лише в процесі геометризації родовища. Отже, одним з основних і поширених завдань, яку необхідно вирішувати під час проведення інженерно-геологічних досліджень, моделюванні та в процесі геометризації розсипних титановмісних родовищ, є обов'язковий аналіз вмісту як корисних так і шкідливих компонентів на певних ділянках. Дані показники й визначають якість мінеральної сировини, а моделі, гірничо-геологічні графіки та креслення – її розподіл в межах самого родовища, кар'єру чи певної виймальної ділянки.

Актуальність геометризації просторового розподілу шкідливих та корисних елементів в умовах розсипних родовищ ільменіту обумовлена кількома ключовими факторами, які впливають на ефективність видобутку, безпеку праці, екологічні аспекти та економічну доцільність.

Геометризація дозволяє створити детальну тривимірну модель розподілу корисних елементів (ільменіту) та шкідливих домішок у родовищі. Це забезпечує можливість планування видобувних робіт таким чином, щоб максимізувати видобуток цінного мінералу та мінімізувати вилучення порід із високим вмістом шкідливих елементів. Завдяки цьому підвищується ефективність процесів збагачення та знижуються витрати на переробку. Цінність родовища зростає, якщо в покладі виявлено два або більше корисні компоненти, видобування їх можливе одночасно [1]. А врахування наявності супутніх корисних компонентів дозволить здійснити комплексну розробку родовища й запобігти втраті корисного компонента.

Чітке розуміння розподілу шкідливих елементів у породах дозволяє вживати відповідних заходів безпеки для захисту працівників. Наприклад, виявлення зон з високим вмістом токсичних елементів дозволяє здійснювати додаткові заходи з вентиляції, використання захисного обладнання та планування безпечних маршрутів видобутку.

Геометризація просторового розподілу шкідливих елементів допомагає мінімізувати негативний вплив на довкілля. Розуміння розташування таких зон дозволяє краще управляти відходами та здійснювати рекультивацию територій. Це важливо для зниження ризику забруднення ґрунтів та водних ресурсів.

Точне картування корисних та шкідливих елементів сприяє більш раціональному використанню ресурсів родовища. Зменшення вмісту шкідливих домішок у видобутій сировині підвищує якість кінцевого продукту, що сприяє його конкурентоспроможності на ринку. Це також знижує витрати на переробку та утилізацію відходів.

Проведення таких досліджень надає цінну інформацію для наукових цілей, дозволяє покращити методи прогнозування та управління мінеральними ресурсами. Це сприяє розвитку гірничих і геологічних наук та підвищенню кваліфікації фахівців у галузі.

Родовища ільменіту Іршанської групи родовищ характеризується значною мінливістю якості показників на невеликих територіях. Таким чином, дослідження родовищ ільменіту є дуже важливим для сучасної промисловості та може значно впливати на економіку. Результати вивчення та геометризація наближено відображають показники родовища корисних копалин, тобто методика геометризації родовищ корисних копалин є методикою геометричного і математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методика геометризації, як в теоретичному, так і в практичному плані, досить добре досліджена та розроблена. Основні принципи цього підходу були викладені у роботах видатного вченого П.К. Соболевського. Також на початку ХХ століття, працями П.М. Леонтовського та В.І. Баумана, були закладені основи гірничої геометрії для математичного опису форм тіл корисних копалин. Далі, П.К. Соболевським були розроблені геометричні (математичні) методи для аналізу та вираження просторового розташування геологічних параметрів.

На сучасному етапі новітні інформаційні розробки та геоінформаційні системи (ГІС) значно впливають на удосконалення процесу геометризації родовищ корисних копалин, відкриваючи нові можливості для ефективного управління мінеральними ресурсами [6–10]. Ці технології забезпечують точність, надійність та швидкість обробки великих обсягів геологічних даних, що є ключовими аспектами у видобувній галузі.

По-перше, використання ГІС дозволяє створювати детальні тривимірні моделі родовищ, які відображають просторовий розподіл корисних та шкідливих елементів. Завдяки цьому геологи та інженери можуть отримувати точну інформацію про структуру родовища, розташування мінералів, а також прогнозувати поведінку геологічних тіл у процесі розробки. Це забезпечує більш ефективне планування видобувних робіт, зменшуючи ризики та оптимізуючи використання ресурсів.

По-друге, сучасні інформаційні технології спрощують процес збору та аналізу геологічних даних. Використання датчиків, дронів та інших автоматизованих систем дозволяє здійснювати швидкий та точний моніторинг стану родовищ. Зібрані дані автоматично інтегруються в ГІС, що забезпечує оперативне оновлення інформації та можливість швидкого реагування на зміни в умовах родовища. Це особливо важливо для управління ризиками та забезпечення безпеки на видобувних підприємствах.

По-третє, застосування інформаційних технологій дозволяє покращити аналіз та інтерпретацію геологічних даних. Завдяки спеціалізованому програмному забезпеченню, такому як модулі для моделювання родовищ, аналізу вмісту мінералів та оцінки запасів, маркшейдери й гірничі інженери можуть проводити складні розрахунки та робити точні прогнози. Це сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо розробки родовищ та підвищує загальну ефективність видобувних операцій.

Крім того, ГІС дозволяють здійснювати комплексний аналіз технічних, геологічних, екологічних та економічних аспектів видобутку корисних копалин. Завдяки можливості інтеграції даних з різних джерел, таких як геологорозвідувальні роботи, бурові роботи, екологічні моніторингові системи, економічні моделі та дані про інфраструктуру, можна оцінювати вплив видобувних робіт на довкілля та економіку регіону. Це дозволяє розробляти стратегії сталого розвитку та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Метою роботи є отримання моделей для Злобичького родовища, які дадуть змогу визначити якість родовища, виявити найбільш рентабельні ділянки для першочергової розробки та обґрунтувати напрями розробки родовища.

Викладення основного матеріалу. Геометризація родовища означає зібрати, систематизувати та використовувати методи статистики, аналізувати його, встановлювати взаємозв'язки між різними характеристиками родовища твердих корисних копалин і графічно відображати цю інформацію. Такий підхід дозволяє краще розуміти умови видобутку та подальшої обробки мінеральної сировини. Ці характеристики охоплюють такі аспекти, як умови розташування покладів, їхні розміри, форма, будова, склад корисних копалин та гірничо-геологічні умови видобутку. Геометризація може включати як кількісну оцінку, так і просторове розташування цих характеристик. Також існують два підходи до геометризації: аналіз форми та аналіз якісних властивостей родовища. Геометризація форми вивчає структурні та морфологічні особливості родовища, в той час як геометризація властивостей досліджує якісні характеристики корисних копалин та їхнє просторове розподілення. Обидва підходи взаємопов'язані і доповнюють один одного.

На етапі розвитку інформаційного забезпечення гірництва використання інформаційно-комп'ютерних технологій дає можливість по-новому підійти до вирішення багатьох традиційних питань, що відображено в [1–7].

В роботі досліджувалося Злобицьке родовище ільменіту (рис. 1). Візуалізація цифрової моделі Злобицького розсіпного родовища ільменіту зображена на рисунках 2–6. Аналіз параметрів, геометризація та побудова моделей виконувалася в програмі «Surfer», метод інтерполяції – кригінг. Статистична обробка результатів здійснювалася за допомогою MS Excel.

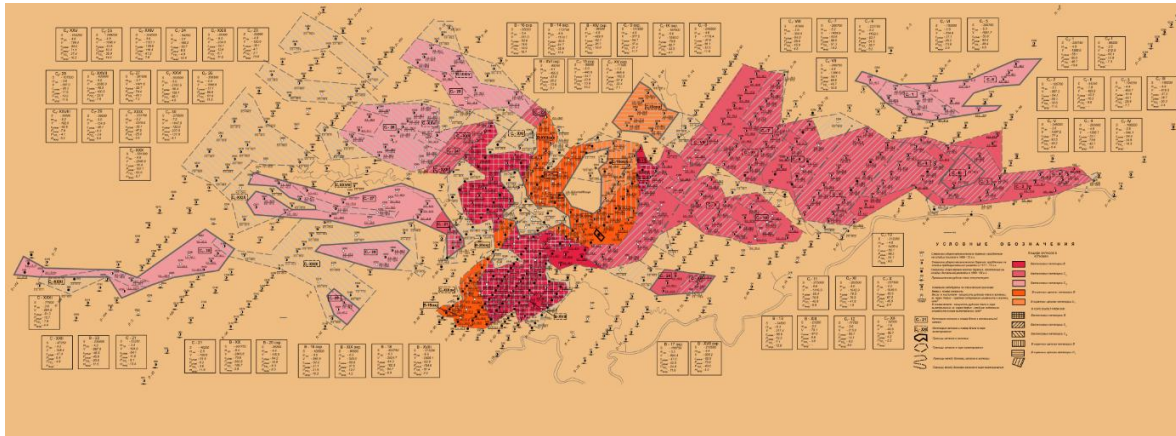


Рис. 1. Злобицьке родовище ільменіту

Для побудови моделей були використані дані з 918 свердловин, що розташовані в межах Злобицького родовища (рис. 2). Були побудовані такі моделі: вміст ільменіту, $\text{кг}/\text{м}^3$ (рис. 3), потужність пласта, м (рис. 4), потужність підшви, м (рис. 5) та потужність торфів, м (рис. 6).

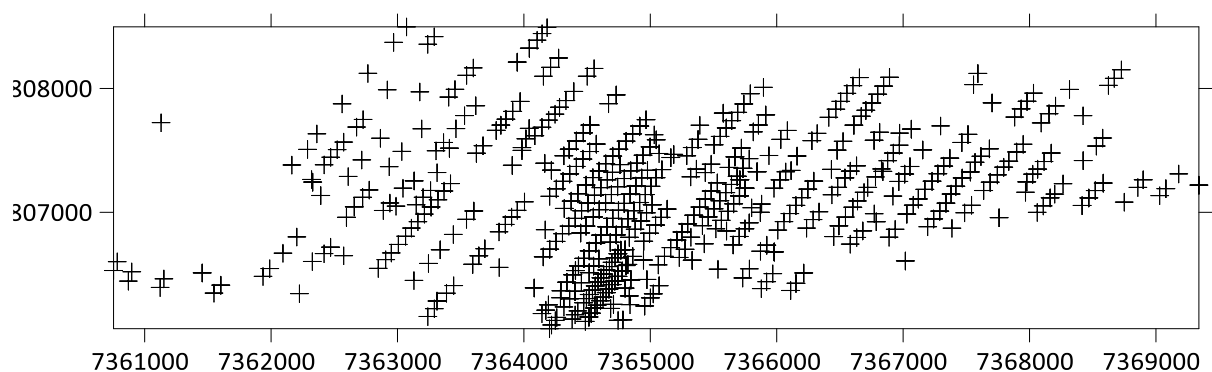


Рис. 2. Розташування розвідувальних свердловин для аналізу та побудови моделей (918 по всьому родовищу)

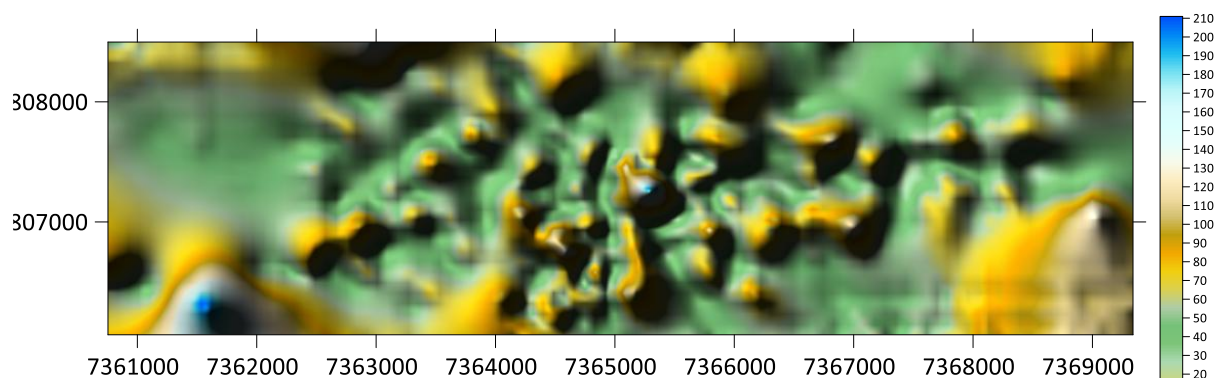


Рис. 3. Вміст ільменіту, $\text{кг}/\text{м}^3$

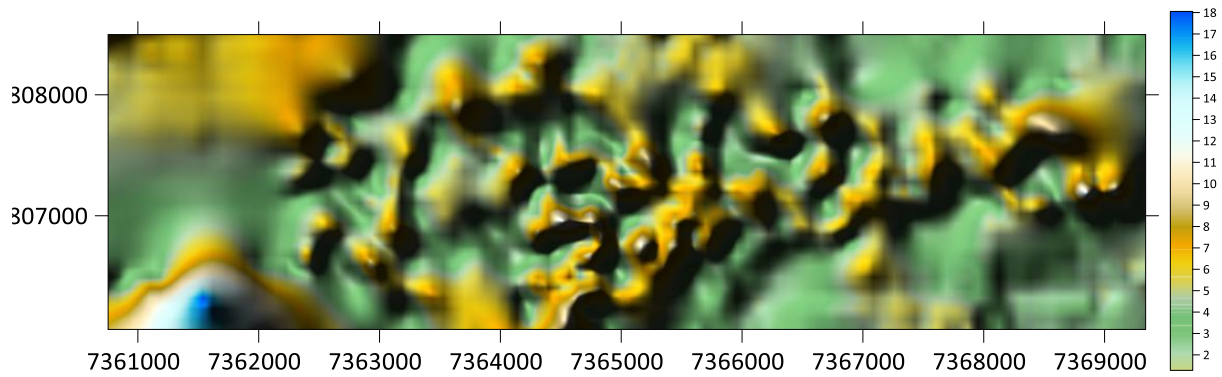


Рис. 4. Потужність пласта, м

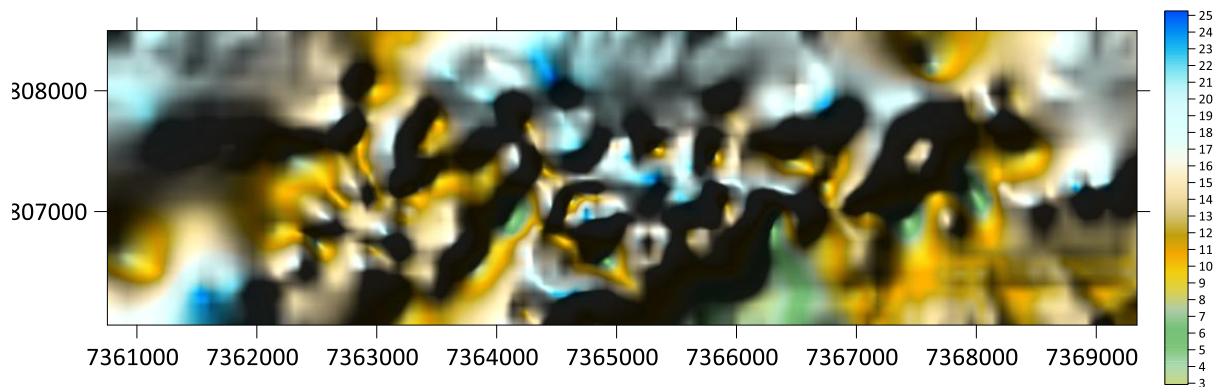


Рис. 5. Потужність підосви, м

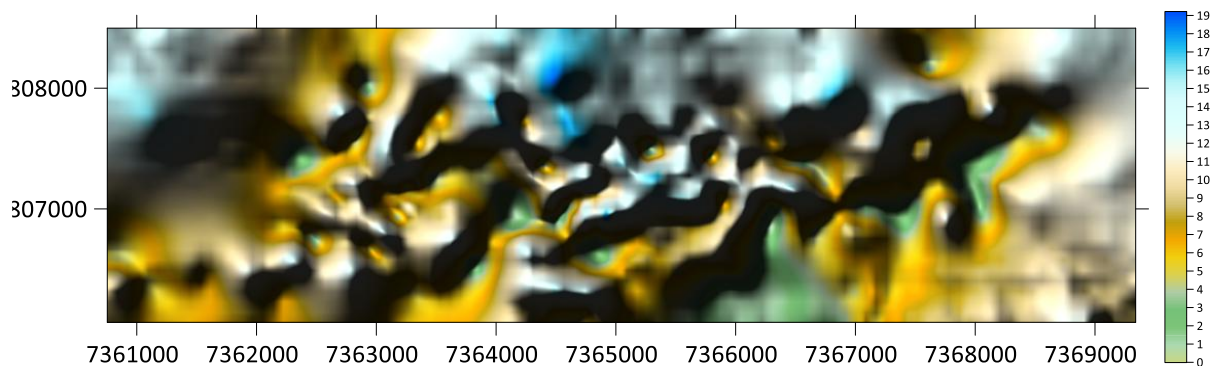


Рис. 6. Потужність торфів, м

На моделях можна чітко виділити ділянки з підвищеним вмістом ільменіту, що розташовані в центральній частині родовища. За даними ізоліній можна констатувати зміну товщини корисної копалини із заходу на схід.

Узагальнення закономірностей зміни потужності продуктивного ільменітового пласта дозволяє стверджувати, що мінливість цього показника характеризується значною нерівномірністю, що не дозволяє встановити зв'язок між мінливістю показників потужності для всього родовища.

Геометричні моделі покладу ільменіту дозволяють більш точно планувати гірничі роботи. Завдяки детальним тривимірним моделям можна визначити оптимальні місця для закладення капітальних гірничих виробок та оптимізувати календарне планування розробки.

Крім того, для Злобицького розсипного родовища ільменіту виділено запаси циркону (рис. 7–8) як другорядного корисного компоненту, що є обов'язковим для вилучення під час розробки родовища. Забезпечення комплексної переробки руд з виділенням циркону зменшує кількість відходів, що залишаються після видобутку, сприяючи більш раціональному використанню природних ресурсів та зменшенню негативного впливу на довкілля.

Відповідно до одержаних даних та побудованих моделей циркон сконцентрований у східній та західній частинах, де переважно бідні руди.

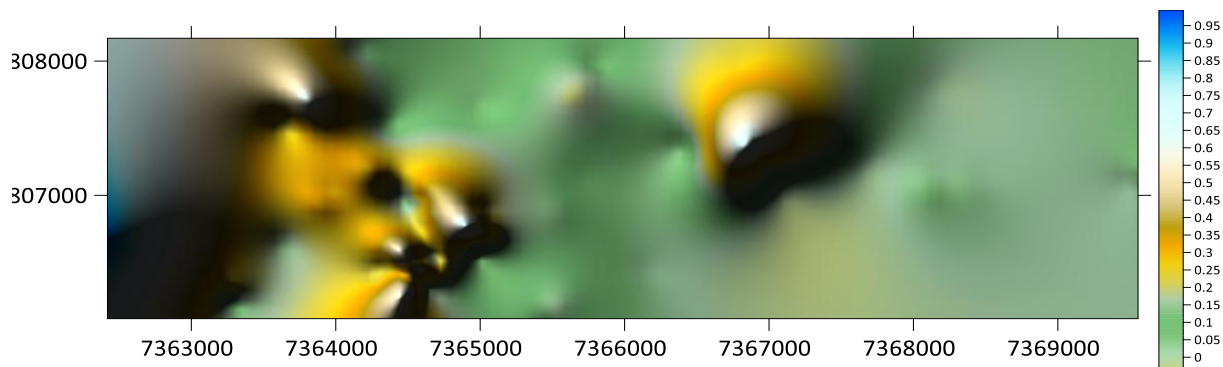


Рис. 7. Вміст циркону, кг/м

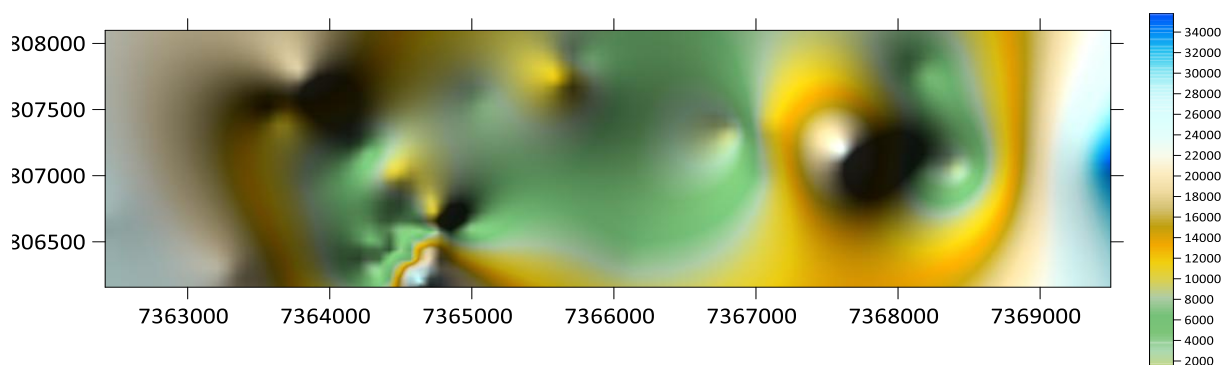


Рис. 8. Об'єм порід, що вміщують циркон

Розподіл та поширення тривалентного заліза наведено на рисунку 9, а двовалентного – на рисунку 10.

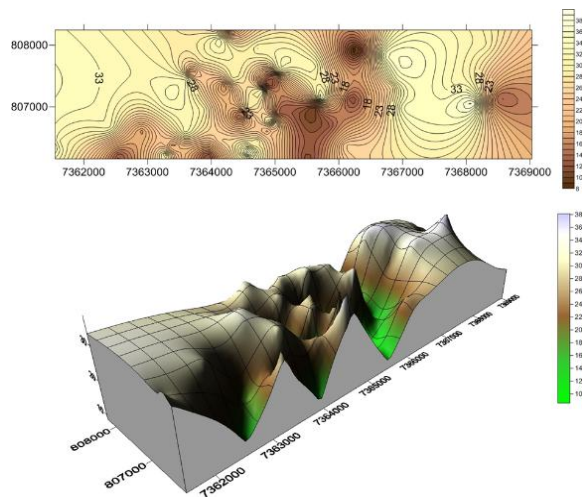


Рис. 9. Розподіл Fe_2O_3 в межах родовища

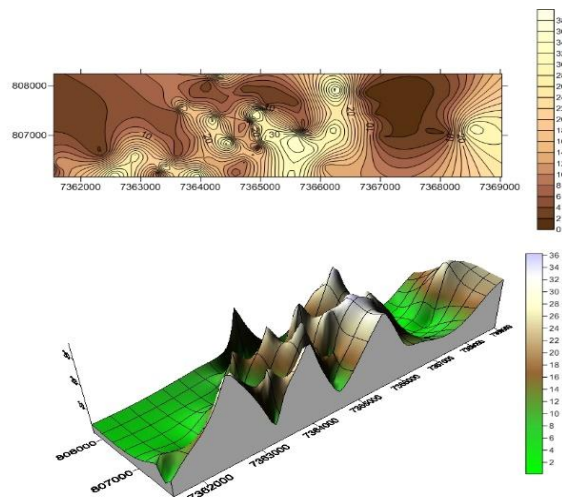


Рис. 10. Розподіл FeO в межах родовища

Розподіл фосфору в межах родовища наведено на рисунку 11. Розподіл даних елементів також потрібно враховувати при розробці родовища.

Побудовані моделі дадуть можливість комплексно використовувати мінеральну сировину, сприяти зменшенню відходів та підвищенню ефективності використання ресурсів. Це особливо важливо в умовах обмежених природних ресурсів і зростаючого попиту на метали.

Окрім корисних компонентів, на родовищі наявні шкідливі домішки у вигляді сидериту, зміненого ільменіту, оксиди хрому. Розподіл оксиду хрому наведено на рисунку 12. Максимальні значення сконцентровані в центрі родовища.

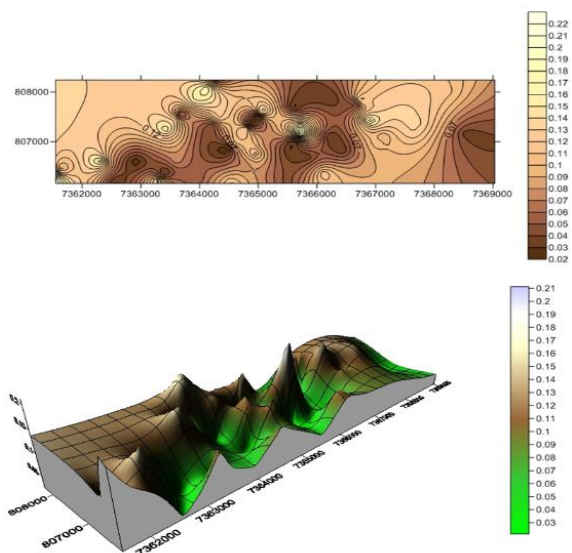


Рис. 11. Розподіл фосфору в межах родовища

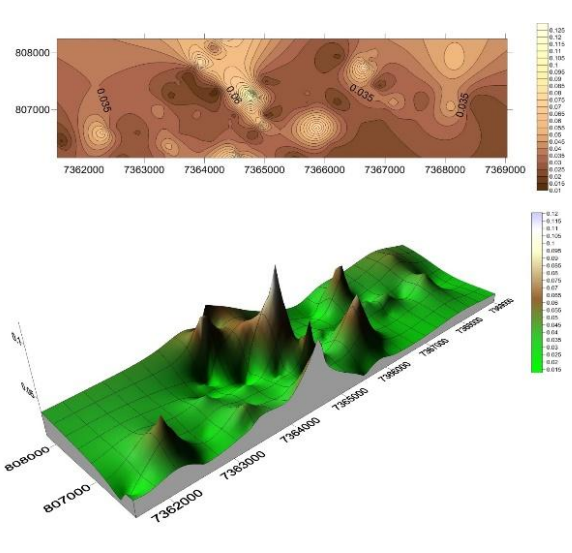


Рис. 12. Розподіл Cr_2O_3 в межах родовища

Для частини пласта, зокрема і для його центральної частини, побудовано модель поширення сидериту (рис. 13), яка показала, що максимальне значення вмісту шкідливої домішки зосереджено в центральній частині родовища – блоках першочергового відпрацювання, адже сидерит є шкідливою домішкою, яка впливає на якість концентрату, іноді взагалі його псує. Для більш детального визначення закономірностей розподілу домішок було побудовано модель вмісту сидериту саме центральної частини родовища, де помітні піки максимальних значень по центру ділянки. Цей аспект потрібно враховувати під час планування та розробки центральної частини і розробити комплекс заходів з нейтралізації негативного впливу сидериту на концентрат ільменіту.

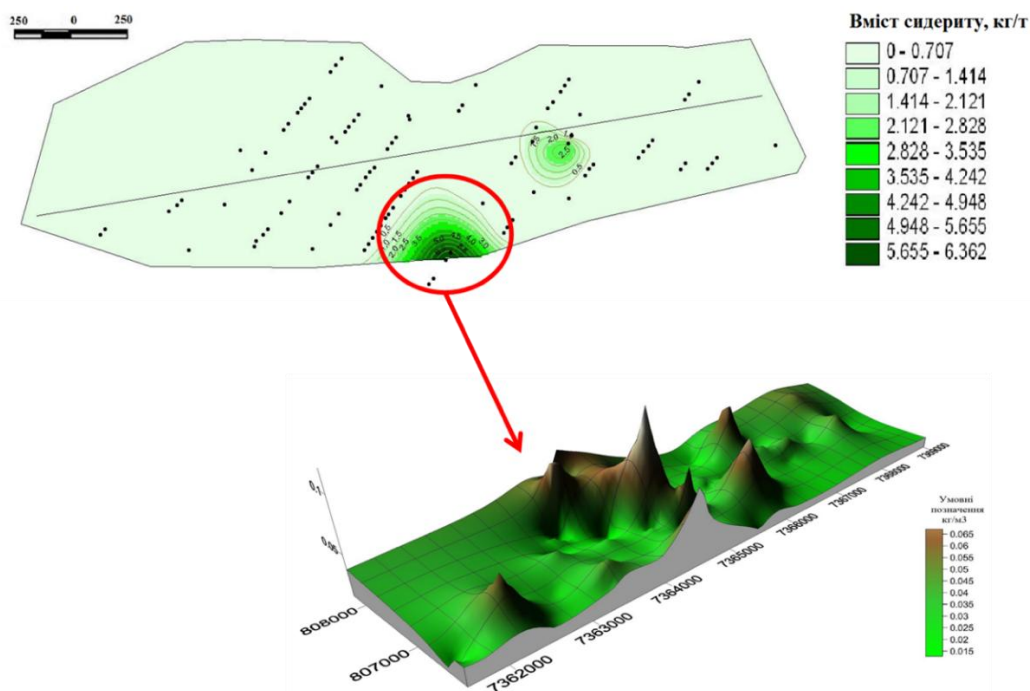


Рис. 13. Модель розповсюдження сидериту в корі вивітрювання Злобицького розсипного родовища ільменіту

Варто відзначити, що для наявних результатів по Злобицькому родовищу не можливо встановити кореляційний зв'язок між основними показниками для всього родовища загалом. Однак, при дослідженні окремих блоків, було встановлено тісний кореляційний зв'язок для певних частин родовища (рис. 14).

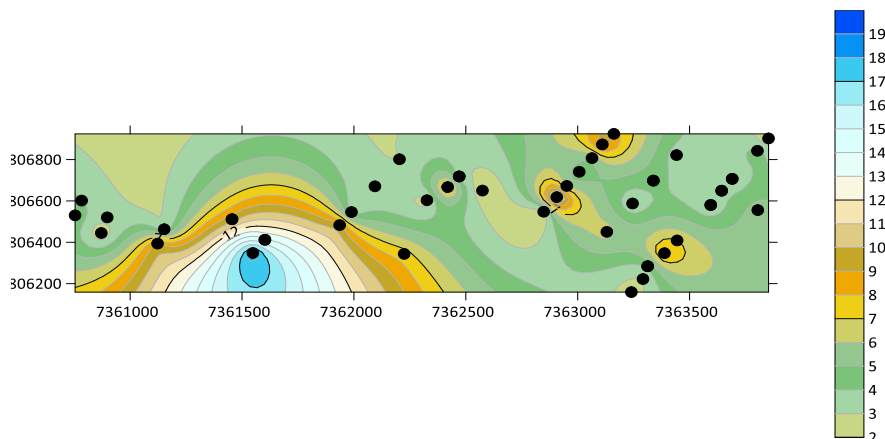


Рис. 14. Частина Злобицького родовища в межах геологорозвідувальних блоків: Блок C2 – 28, Блок C2-30, Блок C2 – XXX та Блок C2 – XXXI.

У результаті було виявлено тісний кореляційний зв'язок між такими параметрами:

- вміст (концентрація) ільменіту та потужність пласта;
- потужність підшови та потужність торфів;
- середній кореляційний зв'язок між потужністю пласта та потужністю підшови.

У результаті чого було встановлено залежність між вмістом (концентрацією) ільменіту і потужністю пласта (рис. 15) у вигляді поліноміальної залежності другого порядку.

$$y = 0,693x^2 - 3,92x + 55,482, R^2 = 0,68. \tag{1}$$

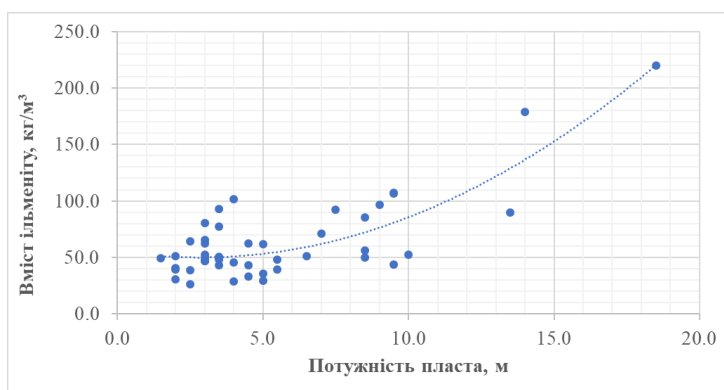


Рис. 15. Залежність вмісту ільменіту від потужності пласта

Встановлено залежність потужності підшови від потужності торфів (рис. 16):

$$y = -0,04x^2 + 1,613x + 3,856, R^2 = 0,69. \tag{2}$$

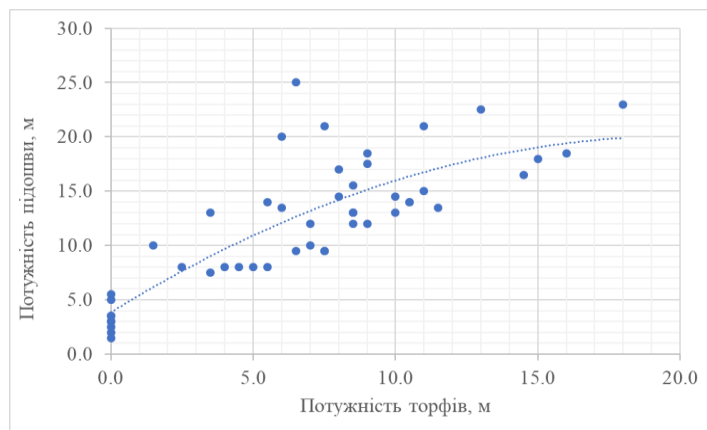


Рис. 16. Залежність потужності підшови від потужності торфів

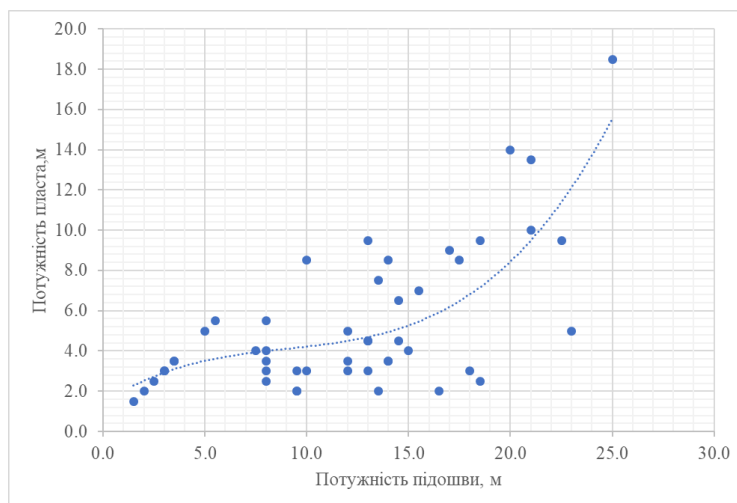


Рис. 17. Залежність потужності пласта від потужності підосви

Також було виявлено залежність між потужністю пласта та потужністю підосви (рис. 17). Дану залежність можна описати поліномом третього порядку:

$$y = 0,0024x^3 - 0,064x^2 + 0,691x + 1,373, R^2 = 0,53. \quad (3)$$

Варто зазначити, що така залежність погано піддається аналітичному опису, оскільки для полінома третього порядку коефіцієнт детермінації складає лише $R^2 = 0,53$. Тому недоцільно рекомендувати її для точного прогнозування зміни потужності пласта від зміни потужності підосви через низьку ймовірність точного прогнозування значень.

Висновки. У результаті дослідження було отримано моделі, які дадуть змогу визначити якість родовища, виявити найбільш рентабельні ділянки для першочергової розробки та обґрунтувати напрями розробки родовища, враховуючи шкідливі та корисні елементи в умовах Злобичького родовища ільменіту.

References:

1. Svalneva, T.V. (2014), *Geology and ore content of the Zlobychi ilmenite placer (Ukrainian Shield)*, Ph.D. Thesis of dissertation, Kyiv, 158 p.
2. Khrushchev, D.P., Lobasov, A.P., Remezova, E.A. et al. (2009), «Digital structural and lithological models as an information and analytical basis for decision-making on the exploitation and protection of mineral resources and geological environment», *Ecological and Environmental Protection*, V International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, Vol. 2, pp. 60–65.
3. Remezova, O.O. (2005), «Problems of the study of ilmenite deposits of the northwestern part of the Ukrainian shield», *Collection of scientific works of the National Mining University*, No. 23, pp. 22–27.
4. Kuzmanenko, H.O., Okholina, T.V., Ganzha, O.A. and Yaremenko, O.V. (2023), «Rare bearing of the Poromivske ilmenite deposit», *Mineral resources of Ukraine*, No. 3, pp. 3–7.
5. Remezova, O., Vasylenko, S., Okholina, T. and Yaremenko, O. (2019), «Elaboration of geological and technological models for rational development of titanium deposits», *Modernization and engineering development of resource-saving technologies in mineral mining and processing*, Multi-authored monograph, UNIVERSITAS Publishing, pp. 431–444.
6. Komliev, O., Bortnyk, S., Remezova, O. et al. (2021), «The use of data on the material composition of sediments during forecasting works of titanium root and placer deposits», *Geoinformatics*, European Association of Geoscientists & Engineers Conference Proceedings, pp. 1–6, doi: 10.3997/2214-4609.20215521163.
7. Vasylenko, S.P., Okholina, T.V., Remezova, O.O. and Yaremenko, O.V. (2016), «The analysis of ilmenite distributing in titanium deposits by GIS-modeling (on the example of Torchyn apatite-ilmenite deposit)», *Teoretychni ta prykladni aspekty gheoinformatyky*, No. 13, pp. 4–13.
8. Krivoruchko, A., Remezova, O., Levytskyi, V. et al. (2024), «Research of geospatial variability of quality indicators of Zlobychi alluvial ilmenite deposit», *Earth and Environmental Science*, IOP Conference Series, Vol. 1319, pp. 1–9, [Online], available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1319/1/012010/pdf>
9. Kynytska, M., Lunov, A., Panasiuk, A. et al. (2023), «Digital simulation of open-pit mining organization system», *GEOMATE Journal*, Vol. 25, Issue 109, pp. 197–204, [Online], available at: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/406>
10. Kynytska, M.S. and Shlapak, V.O. (2023), «Modeliuvannya vydobutku pryrodnoho kameniu», *Tekhnichna inzheneriia*, Vyp. 1 (91), pp. 356–360.
11. Chaikivskiy, D.O. and Kryvoruchko, A.O. (2017), «Kharakterystyka heometryzatsii tytanovoi syrovyny», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysviachenoї Dniu nauky*, 17–19 travnia, ZhDTU, Zhytomyr, Vol. 1, pp. 225–226, [Online], available at: <https://gef-news.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/06/vseukrainska-naukovo-praktychna-on-line-konferentsiya-do-dnya-nauky-2017.pdf>

Куницька Марина Сергіївна – старший викладач кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-2649-0939>.

Наукові інтереси:

- геодезія;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія.

Криворучко Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>.

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування блочного каменю;
- геолого-економічна оцінка рудних та нерудних родовищ корисних копалин.

E-mail: km_kao@ztu.edu.ua.

Скорик Микола Анатолійович – аспірант 1-го курсу (PhD-184-23-2), кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0008-0354-7593>.

Наукові інтереси:

- інноваційні технології в гірництві;
- дистанційне зондування землі;
- моніторинг та моделювання гірничих виробок.

Павлюченко Максим Володимирович – гірничий інженер.

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування блочного каменю;
- розробка програмного забезпечення, автоматизація процесів за допомогою десктопних аплікацій.

Заболотна Юлія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4360-5707>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерський супровід гірничих робіт;
- геометризація родовищ корисних копалин;
- стійкість гірничих виробок.

Kunyt'ska M.S., Kryvoruchko A.O., Skoryk M.A., Pavlushchenko M.V., Zabolotna Y.O.

Geometrization of spatial distribution of harmful and useful elements in the conditions of Zlobytske ilmenite deposit

Geometrization of the deposit consists in collecting, systematizing and using statistical methods to analyze and establish relationships between various characteristics of solid minerals. This approach makes it possible to better understand the conditions of extraction and further processing of mineral raw materials by graphical display of information. Aspects such as the location of deposits, their size, shape, structure, composition of minerals and mining and geological conditions of production are considered.

The study of the spatial distribution of harmful and useful elements allows a better understanding of geochemical processes occurring in the earth's crust, as well as predicting the quality of ore and determining the possibility of its use for industrial purposes.

The main result of the research is the creation of complex models of placers, which help clarify the structure and conditions of deposit formation, identify conventional and low-productivity areas. A relationship between the distribution of ilmenite and the thickness of the ventilation crust was established.

As a result, data were provided for determining optimal mining directions and mineralization zones were identified.

Keywords: geometrization; titanium; ilmenite; Zlobytske deposit.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2024.