

П.Й. ФЕДОРЕНКО, д-р техн. наук, проф., А.В. ПЕРЕМЕТЧИК, канд. техн. наук, доц.,
Т.О. ПОДОЙНІЩИНА, ст. викл., П.В. НАСТІН, студент
Криворізький національний університет

ГІРНИЧО-ГЕОМЕТРИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НАДР

Мета. Метою роботи є геолого-промислова оцінка покладу корисних копалин, яка передбачає правильне визначення кількості і якості розвіданих запасів, вимагає збору і обробки такого матеріалу, який був би достатнім для складання технічно правильного і економічно обґрунтованого проекту освоєння родовища. Ці вимоги ставлять перед геолого-маркшейдерським забезпеченням гірничих підприємств все більш складні завдання. Забезпечення правильного освоєння родовища є пріоритетною виробничою задачею, що базується на науково обґрунтованій оцінці гірничо-геометричних характеристик покладу корисних копалин та чіткого уявлення про характер та кількість запасів родовища.

Методи дослідження. Методика дослідження полягає у гірничо-геометричному моделюванні та моніторингу надр на основі прогресивних та класичних способів і методик геометризації масиву корисних копалин та вміщуючих порід. Це включає в себе комплекс заходів, направлених на збір та оцінку вихідної інформації, її оцінку точності, математичне опрацювання та визначення оптимальних та найефективніших методів вирішення задачі геометризації родовища.

Наукова новизна. Застосовано комплекс методів оцінки мережі опробування та оцінки мінливості вмісту корисного компоненту. Ці методи базуються як на статистичних розрахунках, так і на програмних методах, що реалізуються у геоінформаційних системах.

Практичне значення. Застосовані методи дають змогу практично розв'язувати задачі гірничого виробництва, пов'язані з оцінкою запасів родовища корисних копалин, їх генезису, характеру залягання, якості, можливості сортування, прогнозування та промислового освоєння.

Результати. Отримано результати, які дають максимально повне уявлення про характер запасів родовища корисних копалин, можливість промислового освоєння та його послідовність. Показано переваги комплексу методів, що базуються на статистичній оцінці покладу корисних копалин, а також застосування новітніх геоінформаційних систем, що забезпечують можливість якісного і точного підрахунку та оцінки запасів родовища корисних копалин.

Ключові слова: геометризація, гірничо-геометричне моделювання, розвідувальна мережа, методи статистичної оцінки, крайгінг, мінливість геологічних показників, геоінформаційні системи.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-7-14

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Для рудних родовищ особливе значення має геометризація якості і фізико-хімічних властивостей гірських порід і мінеральної сировини, що є одним із найважливіших завдань оцінки гірничого підприємства. Графоаналітичним шляхом вдається встановити просторовий розподіл змісту і створити своєрідну модель, визначити взаємозв'язок між компонентами. Освоєння родовища потребує значних затрат, і їх ефективність напряму залежить від повноти та якості інформації про поклади родовища, їх склад, наявність корисних компонентів та, безпосередньо, запасів корисних копалин. Ці задачі можливо вирішити на основі комплексу досліджень, направлених на геометризацію, статистичну оцінку родовища, та моделювання і моніторинг його форми, властивостей і об'ємів.

Аналіз досліджень і публікацій. Геометризація та моделювання надр базується на інформації про геологічні, геохімічні, геомеханічні та інші поля, що характеризують різні ознаки і показники (будова, властивості, стан) гірського масиву і джерел георесурсів, які моделюються геометрично, в тому числі за допомогою поверхонь топографічного порядку і різних видів проекцій. Геометризація є методичною основою геометрії надр. Комплекс методик геометризації полягає у збиранні та і комплектуванні вихідної інформації, одержуваної при розвідці, маркшейдерських зйомках, випробуванні, геофізичних та спеціальних дослідженнях; систематизації, попередньої обробки та оцінки точності інформації з використанням варіаційної статистики, теорії випадкових функцій, кінцевих різниць; математичному та геометричному моделюванні та оцінці точності моделі; використанні моделі для вирішення задач розвідки і промислового освоєння, а також визначення геолого-генетичного складу родовища.

Постановка задачі. Завданням геометризації родовища корисних копалин є отримання інформації про поклади та її систематизація з метою її подальшого практичного застосування і вирішення задач гірничого виробництва. Одним із застосувань геометризації є оцінка запасів

корисних копалин. Це зумовлює необхідність створення комплексу методів, що дадуть змогу виконати з максимальної ефективністю підрахунок запасів гірничого підприємства.

Викладення матеріалу та результати. Як приклад геометризації родовища візьмемо результати підрахунку балансових запасів ільменіту Бирзулівського родовища в програмі MicroMine.

Підрахунок запасів ільменіту Бирзулівського родовища виконувався за допомогою системи MicroMine методом блокового моделювання, який є одним з найбільш сучасних та об'єктивних методів оцінки ресурсів і запасів корисних копалин, що використовується у всьому світі.

Для підрахунку запасів в середовищі MicroMine створено проект, основою якого є база даних Бирзулівського родовища. Вона складається з двох файлів: Collar.dat (містить інформацію по свердловинах – рис. 1, 2) і Assay подсчет.dat (містить інформацію по пробах – рис. 3), що мають наступну структуру.

ИМЯ ПОЛЯ	ТИП	ШИРИНА<256	ПОСЛЕ ЗАП.
1 BVID	C	20	
2 X	R		3
3 Y	R		3
4 Z	R		3
5 DEPTH	R		3
6 Database	C	9	

Рис. 1. Структура файлу Collar.dat бази даних Бирзулівського родовища

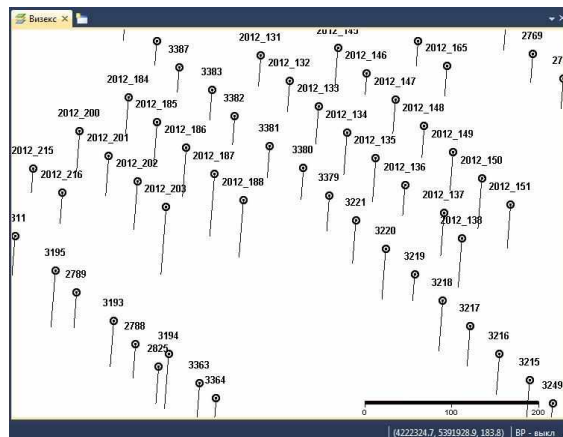


Рис. 2. 3D-візуалізація свердловин, пробурених на Бирзулівському родовищі, за інформацією з файлу Collar.dat

ИМЯ ПОЛЯ	ТИП	ШИРИНА<256	ПОСЛЕ ЗАП.
1 BVID	C	20	
2 X	R		3
3 Y	R		3
4 Z	N	20	3
5 Каркас руда	C	11	
6 FROM	R		3
7 TO	R		3
8 Length	R		3
9 Sample n	L		
10 Material	C	18	
11 Weathering crust	C	16	
12 Drilling	C	3	
13 Lithcode	L		
14 SG	R		3
15 ILMwt%	R		3
16 ILMkgm3	R		3
17 TotILMkg	R		3
18 ILMkgm3_CUT	R		3

Рис. 3. Структура файлу Assay подсчет.dat бази даних Бирзулівського родовища

Крім того, включені графічні матеріали попереднього підрахунку, запасів, а саме: план підрахунку запасів та відповідні розрізи, шляхом їх координатної прив'язки (рис. 4, 5). Завдяки цьому за необхідності результати, отримані в процесі роботи, можна легко порівняти шляхом накладання та співставлення.

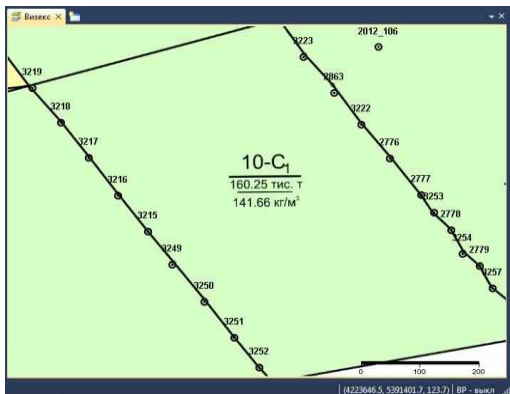


Рис. 4. План підрахунку запасів та свердловини, винесені з бази даних в середовищі MicroMine

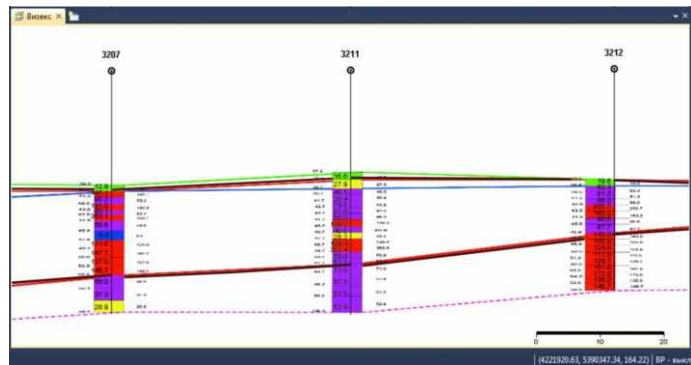


Рис. 5. Розріз та дані по свердловинах, винесені з бази даних в середовищі MicroMine

На першому етапі роботи з базою даних було здійснено статистичний аналіз розподілу значень вмісту ільменіту Бирзулівського родовища. Розподіл в пробах оцінюється, як бімодальний логнормальний (рис. 6). Бімодальний розподіл компоненту у геологічному сенсі прийнято пояснювати двома різними геологічними процесами (або двома різними стадіями одного процесу). У випадку Бирзулівського родовища, уявляється, що спочатку формувалася рудна товща з первинним розподілом в ній ільменіту, а потім рудний компонент перерозподілявся в межах товщі, скоріше за все під дією гравітаційних факторів. Про це свідчать підвищені значення вмісту ільменіту саме у нижній частині товщі (ближче до підшови – покрівлі кори вивітряння).

Згідно результатів стандартних вбудованих функцій MicroMine, статистичні параметри для вихідної вибірки проб становлять (рис. 7).

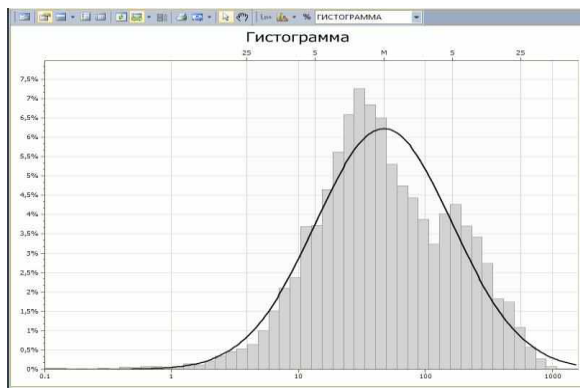


Рис. 6. Гістограма розподілу вмістів ільменіту в пробах по Бирзулівському родовищу (шкала – натуральний логарифм, побудовано в середовищі MicroMine)



Рис. 7. Параметри розподілу вмістів ільменіту в пробах по Бирзулівському родовищу

Для логнормально розподіленої величини використовуються результати «логарифмічної статистики», а саме: L_n середнього (x) – 4,018, L_n стандартного відхилення (σ) – 1,327. За правилом «трьох сігм» всі значення нормально розподіленої випадкової величини лежать в межах $x \pm 3\sigma$ (для логнормального розподілу те саме стосується логарифмів цих величин). Для вибірки результатів мінералогічного аналізу пісків Бирзулівського родовища максимальні значення вмісту ільменіту не повинні перевищувати:

$$\text{Exp}(4,018+3*1,327)=\text{Exp}(7,999)=2977,98.$$

Таким чином, можна зробити висновок про те, що серед значень вихідної вибірки по Бирзулівському родовищу немає таких, що не підкорюються законам визначеного розподілу – ураганних значень. На основі виконаних обрахунків було вирішено не виключати максимальні значення вмістів ільменіту при підрахунку запасів.

Далі, на основі результатів опробування (ASSAY подсчет.dat) було створено композити (об'єднані інтервали) за вмістом ільменіту в окремих пробах за економічно обґрунтованими кондиціями. Крім того, використовувалося поняття метропроценту (добуток вмісту корисного компоненту і потужності рудної товщі), який складав $20 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м}$. Метропроцент використовується для включення інтервалів (рудоперетинів) з відносно низьким вмістом при великій потужності, або навпаки – при малій потужності з дуже високим вмістом.

З використанням композитів по кожному з розрізів оконтурено покрівлю та підшову корисної копалини (рис. 8, 9).

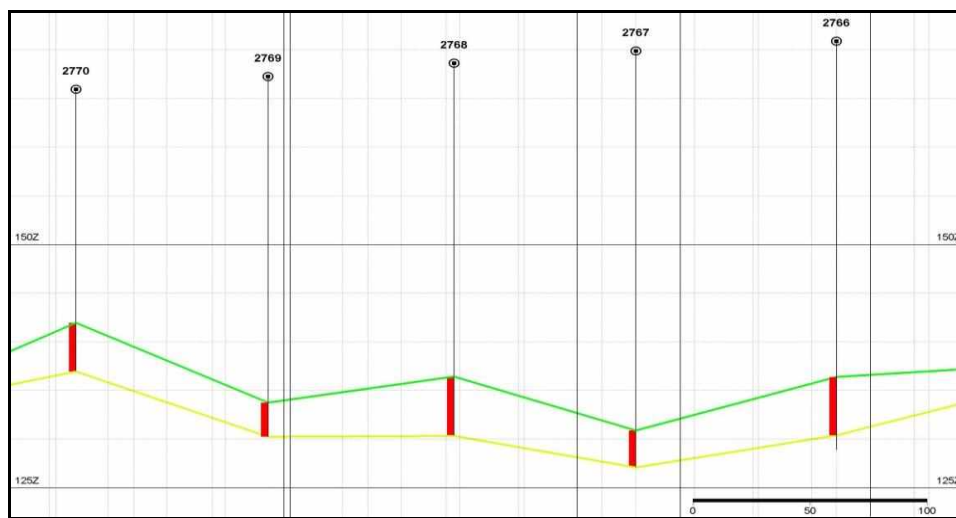


Рис. 8. Покрівля та підшва корисної копалини, оконтурені у розрізі з використанням композитів (об'єднаних інтервалів)

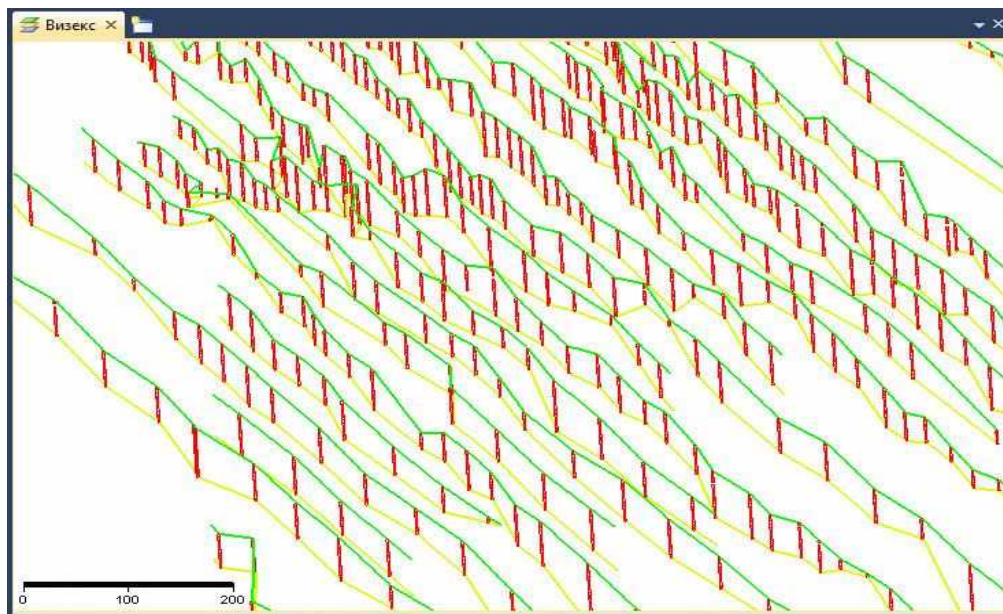


Рис. 9. Покрівля та підшва корисної копалини, оконтурені по розрізах з використанням композитів (об'єднаних інтервалів)

За допомогою функції для створення цифрових моделей поверхонь, контури покрівлі та підшови по розрізах поєднано в дві поверхні: поверхня покрівлі і поверхня підшови. В подальшому вони перетворюються на каркас, що обмежує корисну копалину з усіх боків (рис. 10).



Рис. 10. Каркас, що обмежує рудну товщу Бирзулівського родовища

Каркас не включає площу позабалансових запасів (обмежується межею «баланс-позабаланс» за допомогою функції обрізки каркасу полілінією).

В межах отриманого каркасу створено порожню блочну модель. Форма елементарного (одиночного) блоку блочної моделі визначається формою розсипу (рудної товщі). Для Бирзулівського родовища характерним є невелика потужність у порівнянні з площею розповсюдження. За наявними матеріалами не спостерігається явної витягнутої форми в плані у якомусь з напрямків. Тому найбільш оптимальною уявляється форма зі співвідношеннями довжини, ширини і потужності $\sim 10 \times 10 \times 1$.

Розмір елементарного (одиночного) блоку (субблоку) блочної моделі визначається з урахуванням двох основних факторів. По-перше, не має необхідності робити одиничний блок менше, ніж забезпечує селективний видобуток корисної копалини обрана технологія розробки. По-друге, одиничний блок повинен бути настільки малим, щоб досить точно описати конфігурацію поверхонь рудної товщі. Для блочної моделі Бирзулівського родовища було обрано розмір одиничних блоків $10 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 1 \text{ м}$, субблоків – $2 \text{ м} \times 2 \text{ м} \times 0,2 \text{ м}$ (рис. 11).

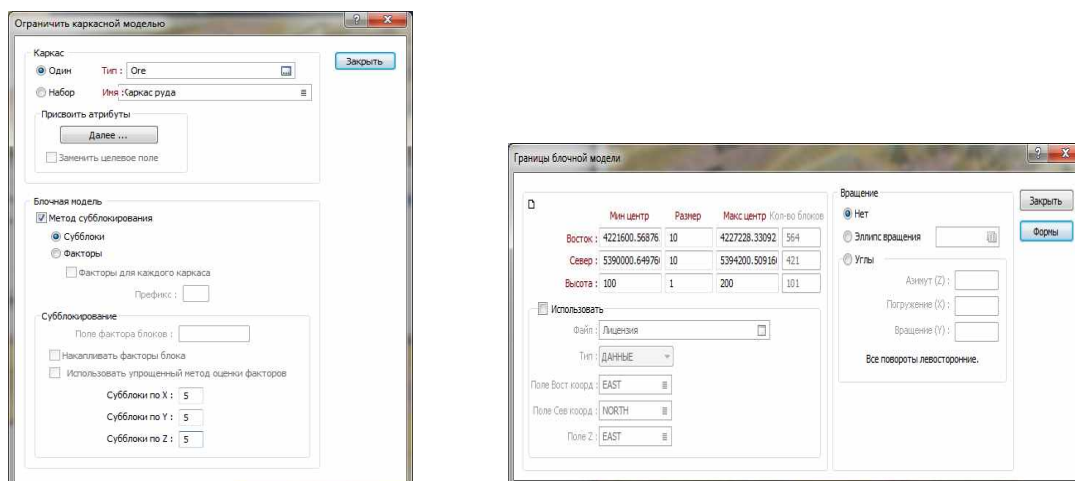


Рис. 11. Параметры, что задавались при створенні блочної моделі Бирзулівського родовища

Створену модель «заповнено» проінтерпольованими значеннями вмісту ільменіту методом зворотних відстаней за допомогою функції 3D-оцінка блоків (рис. 12). При цьому інтерполяція

відбувається в кілька етапів, кожен з яких відповідає певній категорії запасів (B, C1, C2). Одним з важливих параметрів інтерполяції є розміри еліпсу «пошуку», вони збільшуються від вищої категорії запасів до нижчої і базуються на параметрах обґрунтованої бурової мережі (100 м×40 м, 200 м×60 м, 400 м×80 м відповідно).

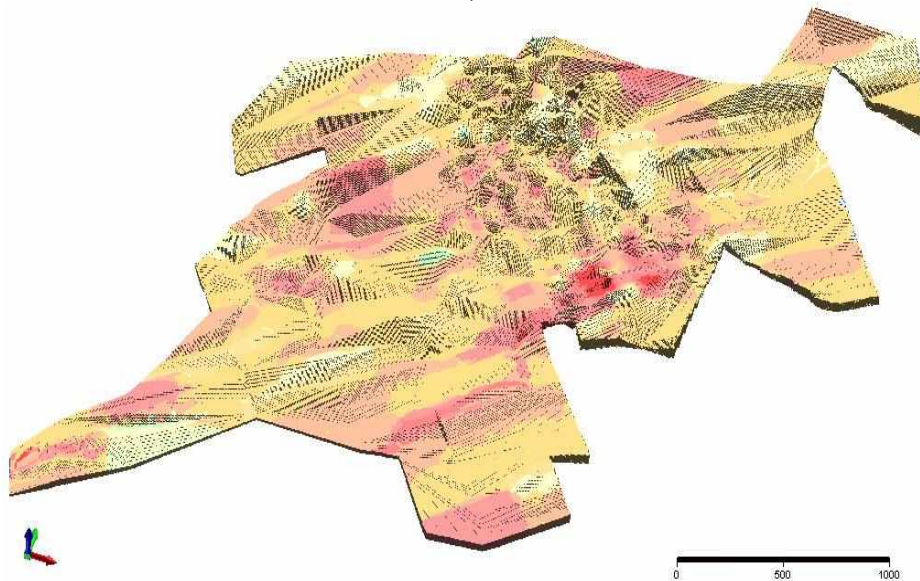


Рис. 12. Блочна модель Бирзулівського родовища (кольором показано вміст ільменіту, який збільшується від зеленого до червоного)

В результаті отримано блочну модель родовища, яка відображає розподіл ільменіту. Необхідно відмітити, що модель дає змогу не лише з більш високою точністю оцінювати запаси та інші параметри родовища, але і оперативно приймати рішення про напрямок видобувних робіт в залежності від кон'юнктури ринку ільменітового концентрату або інших факторів. Підрахунок запасів ільменіту виконувався по трьох класах (категоріях), які мають такі параметри (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри бурової мережі для класів та категорій запасів Бирзулівського родовища

Код класу	Категорія запасів	Ступінь геологічного вивчення	Параметри бурової мережі
111	B	Розвідані (доведені) запаси	100 м×40 м
121	C1	Розвідані (доведені) запаси	200 м×60 м
122	C2	Попередньо розвідані (ймовірні) запаси	400 м×80 м

Для розмежування запасів різних класів та категорій було створено замкнуті контури, які обмежують площі різного ступеня вивченості (рис. 13).

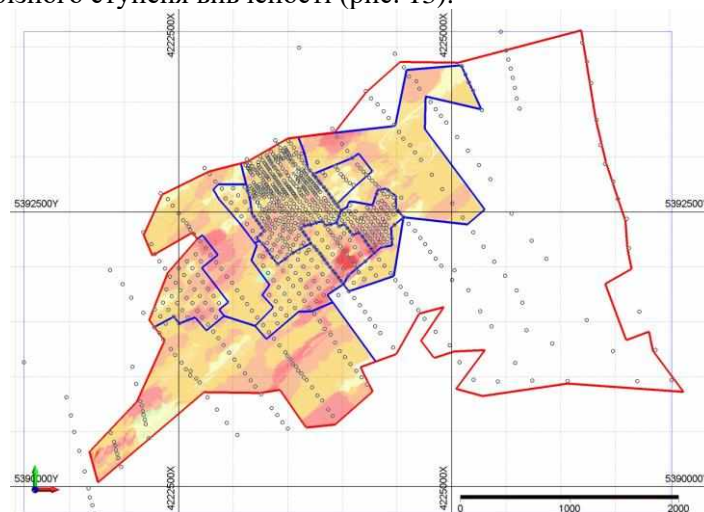


Рис. 13. Розподіл площі Бирзулівського родовища за класами (категоріями) запасів

За допомогою присвоєння індексів контурів категорій кожному з блоків, всі запаси блочної моделі було поділено на відповідні класи (категорії). В результаті створення звіту по блочній моделі було отримано розподіл запасів ільменіту Бирзулівського родовища по категоріях без урахування видобування (рис. 14).

	ОБЪЕМ	ТОННЫ	ПЛОТНОСТЬ	TotLMkg new (кг/м3)	M_TotLMkg new (т)	КАТЕГОРИЯ наш
1	13085007.23	22375362.36	1.7100	157.78267	2064587.34214	B
2	2915760.81	4985950.98	1.7100	130.85125	381530.94832	C1
3	17677204.86	30228020.31	1.7100	117.64955	2079715.23466	C2

Рис. 14. Звіт по блочній моделі Бирзулівського родовища з розподілом запасів по категоріях

В результаті загальна кількість балансових запасів (B+C1+C2) ільменіту Бирзулівського родовища (без урахування видобутку) склала 4526 тис.т. Похибка підрахунку запасів склала 8,3%.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Показано вирішення актуальної науково-технічної задачі геометризації запасів гірничого підприємства, спрямованої на забезпечення процесу гірничого виробництва. Комплекс розглянутих методів є практично застосовуваним, а дослідження, направлені на його вдосконалення є вельми перспективними.

Список літератури

1. Букринский В.А. Геометрия недр: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985.
2. Гудков В.М. Сравнение распределения пространственных переменных. // Маркшейдерский вестник, 1997. – № 1. – С. 8-11.
3. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. – Л.: Недра, 1980.
4. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. – М. – 1974. – 481 с.
5. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Книга 1. – М.: Недра. – 1990. – 246 с.
6. Класифікація запасів та ресурсів корисних копалин Державного фонду. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України №432 від 5.05.1997 р. – Київ: Державний комітет України при Міністерстві екології та природних ресурсів. – 1997.
7. Калинин В.М. Многомерная геометризация форм и качественных свойств месторождений // Маркшейдерское дело и геодезия. Межвузовский сборник. – 1979. – вып. 6. – с. 99-105.
8. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. – М.: Мир. – 1969. – 400 с.
9. Крамбейн У., Кауфмен М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов – М.: Мир. – 1973. – 150 с.
10. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М.: Мир, 1982.
11. Методичний посібник з оцінки перспективних та прогнозних ресурсів твердих корисних копалин. – К.: УкрДГРІ. – 2010. – 25с.
12. Миллер Р.Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. – М.: Мир. – 1965. – 482 с.
13. Низгурецкий З.Д. К приложению теории нестационарных случайных функций для оценки результатов геометризации месторождений. – Л.: изд. ВНИМИ. – 1974. – Сб. № 93. – С. 99–113.
14. Низгурецкий З.Д. Использование элементов теории случайных функций для оценки точности определения содержания полезного компонента и мощности залежи при геометризации. – Тр. ВНИМИ. – Т. 40. – 1963. – С. 292-311.
15. Переметчик А.В. Разработка эвристического алгоритма прогнозирования геологических показателей месторождений полезных ископаемых // Разработка рудных месторождений: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Кривой Рог: КТУ. – 2004. – Вып. 85 – С. 194 – 200.
16. Положення про порядок розробки та обґрунтування умов мінеральної сировини для розрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах, затверджене наказом Державного комітету з мінеральних ресурсів від 07.12.2005 № 300.
17. Krige D.G. A review of development of geostatistics in South Africa // In: Advanced Geostatistics in the Mining Industry. Reidel, Dordrecht, Netherlands. 1976. P. 279-294.
18. Marechal A., Serra J. Random kriging // In: D.F. Merriam (Editor), Geostatistics. A Colloquium. Plenum Press, New York. 1970. P. 91-112.
19. Matheron G. Kriging or polynomial interpolation procedures. – CIMM Trans., 70. 1967. P. 240-244.
20. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. – Adv. Appl. Prob., 5. 1973. P. 439-468.

Рукопис подано до редакції 10.03.2021