

UDC 528.721.221.6:622.271.3

## **Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Application of mining and geological information systems (MGIS) and a digital twin of a block for managing ore quality during underground mining**

Применение горно-геологических информационных систем (ГГИС) и цифрового  
двойника блока для управления качеством руды при подземной отработке  
месторождений

**Arno Veronika Vladimirovna**

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,  
North-Eastern State University, Magadan

**Kolesnichenko Eva Pavlovna**

Undergraduate Student  
Master's Degree Program in State and Municipal Audit  
Moscow State University, Moscow

**Garifulina Irina Yurievna,**

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,  
North-Eastern State University, Magadan

**Remizov Nikita Andreevich,**

Undergraduate Student  
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Арно Вероника Владимировна  
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-  
Восточный государственный университет, г. Магадан

Колесниченко Ева Павловна,  
Студентка 3 курса  
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»  
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-  
Восточный государственный университет, г. Магадан

Ремизов Никита Андреевич,  
Студент 3 курса  
Политехнический институт  
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

**Abstract.** *The paper examines the methodology of applying MGIS Micromine and the concept of a digital block twin (DBT) for real-time ore flow quality management in underground mining operations. The deposit block model construction algorithm, the ordinary kriging grade interpolation method, and the closed-loop quality management scheme are presented. A quantitative assessment of the DBT impact on key performance indicators is carried out: ore dilution decreases from 18.4% to 11.6%, and metal losses are reduced from 12.4% to 3.1%. The economic benefit from implementation amounts to 47–62 million rubles per year at a mine with an annual output of 500,000 tonnes of ore.*

**Keywords:** MGIS, digital block twin, ore quality management, kriging, block model, dilution, underground mining.

**Аннотация.** *Рассматривается методология применения ГГИС Micromine и концепции цифрового двойника блока (ЦДБ) для оперативного управления качеством рудного потока при подземной разработке.*

*Представлены алгоритм построения блочной модели месторождения, методика интерполяции содержаний методом ординарного кригинга и схема замкнутого цикла управления качеством. Выполнена количественная оценка влияния ЦДБ на ключевые показатели: разубоживание снижается с 18,4 до 11,6%, потери металла – с 12,4 до 3,1%. Экономический эффект от внедрения составляет 47–62 млн руб./год на предприятии производительностью 500 тыс. т руды в год.*

***Ключевые слова:** ГГИС, цифровой двойник блока, управление качеством руды, кригинг, блочная модель, разубоживание, подземная разработка.*

---

## *Введение*

Управление качеством рудного потока — одна из ключевых задач горнодобывающего предприятия, определяющая технологические показатели обогатительной фабрики и экономическую эффективность производства в целом. Традиционные методы опробования очистных выработок и ручного учёта горной массы характеризуются значительным временным лагом (12–24 часа между отбором пробы и получением результата) и охватом не более 15–20% добычного фронта. В результате отклонения фактического содержания полезного компонента от планового достигают  $\pm 25\text{--}40\%$ , что приводит к нестабильному питанию ОФ и сверхнормативным потерям в хвостах.[1-3]

Горно-геологические информационные системы (ГГИС), такие как Micromine, Datamine, Learfrog, позволяют создавать трёхмерные блочные модели месторождений и выполнять геостатистическую оценку содержаний с погрешностью дисперсии кригинга  $\sigma_K^2 < 0,15 \text{ (г/т)}^2$  при шаге опробовательской сети 20–40 м. Концепция цифрового двойника блока (ЦДБ) предусматривает динамическое обновление блочной модели по мере поступления новых данных опробования, фактических объёмов добычи и показаний датчиков АСУ ГТК, формируя «живой» цифровой образ разрабатываемого рудного тела.[4-7]

Цель работы — обосновать методику применения ГГИС и ЦДБ для управления качеством руды при подземной отработке, выполнить количественную оценку её эффективности.

## Материалы и методы

### Характеристика объекта

Исследование выполнено применительно к условному золоторудному месторождению жильного типа с подземной разработкой (система этажно-камерная, камерно-столбовая). Основные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	Значение
Балансовые запасы, тыс. т	4 500
Среднее содержание Au, г/т	4,8
Производительность рудника, тыс. т/год	500
Число действующих очистных блоков	12–18
Размер блока (высота × длина × ширина), м	50 × 60 × 5–8
Система разработки	Этажно-камерная с закладкой
Нормативное разубоживание, %	≤ 15
Нормативные потери металла, %	≤ 5

### Программное обеспечение и инструменты

Применялись ГГИС Micromine 2020.5 (блочное моделирование, кригинг, геостатистический анализ) и система мониторинга качества на базе АСУ ГТК (диспетчеризация рудопотоков, координаты точек разгрузки). Цифровой двойник блока формировался как динамическая блочная модель с циклом обновления 4 часа по данным: (1) оперативного опробования горных выработок, (2) показаний онлайн-анализаторов Au на конвейерных трактах, (3) системы позиционирования горной техники.[8-9]

### Построение блочной модели

Каркасные модели рудных тел строились по интерпретированным разрезам с шагом 10 м. Параметры блочной модели принимались:  $dx = dy = 5$  м,  $dz = 2,5$  м (субблоки  $2,5 \times 2,5 \times 1,25$  м). Для оценки содержаний применялся ординарный кригинг (ОК).

### Методика ординарного кригинга

Оценка содержания полезного компонента  $\hat{Z}(x_0)$  в блоке выполняется как взвешенная линейная комбинация данных опробования в окрестности блока:[5]

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

при условии несмещённости:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

Веса  $\lambda_i$  определяются из системы уравнений кригинга:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0), i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\gamma(x_i, x_j)$  — значение вариограммы между точками  $x_i$  и  $x_j$ ,  $\mu$  — параметр Лагранжа. Дисперсия кригинга (мера неопределённости оценки):

$$\sigma_K^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu \quad (4)$$

Модель вариограммы принята сферическая с параметрами:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \text{Sph}(h/a) = 0,08 + 0,77 \cdot \text{Sph}(h/25) \quad (5)$$

где  $C_0 = 0,08$  (г/т)<sup>2</sup> — эффект самородка,  $C_1 = 0,77$  (г/т)<sup>2</sup> — структурный вклад,  $a = 25$  м — радиус влияния (сфера влияния).

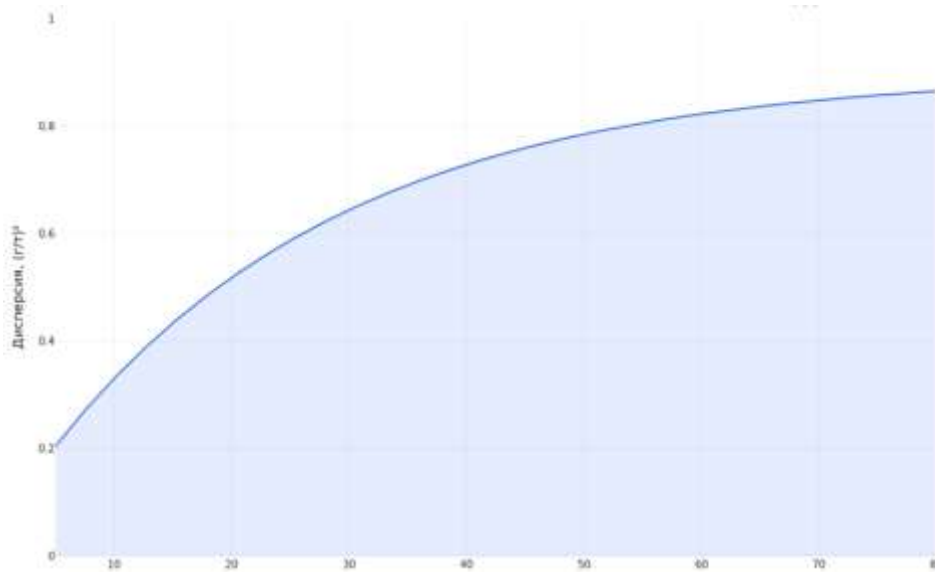


Рисунок 1- Кригинг-дисперсия vs расстояние между скважинами

Алгоритм управления качеством с ЦДБ

Замкнутый цикл управления качеством включает следующие этапы:

Планирование: из ЦДБ извлекается план содержаний  $Z^{\text{plan}}$  для каждого очистного блока на плановый период;

Мониторинг: по данным опробования и АСУ ГТК формируется фактическое содержание  $Z^{\text{fact}}$ ;

Контроль отклонения: вычисляется относительное отклонение  $\delta$ :

$$\delta = \frac{|Z^{\text{fact}} - \hat{Z}^{\text{plan}}|}{\hat{Z}^{\text{plan}}} \times 100\% \quad (6)$$

Корректирующее воздействие: при  $\delta > \delta_{\text{lim}} = 10\%$  выполняется пересчёт блочной модели с включением новых данных опробования и корректировка плана очистной выемки;

Обновление ЦДБ: по данным входного контроля ОФ модель обновляется с весом новых данных:

$$\hat{Z}^{\text{new}} = (1 - \alpha)\hat{Z}^{\text{old}} + \alpha Z^{\text{assay}} \quad (7)$$

где  $\alpha = 0,3$  — коэффициент обновления (определяется из условия минимизации среднеквадратического отклонения прогноза).

### Результаты

Показатели точности блочной модели

По результатам сравнения расчётных содержаний блочной модели с данными контрольного опробования ( $n = 120$  блоков) таблица 2.

Таблица 2.

Показатель	Без ЦДБ (статичная модель)	С ЦДБ (динамическое обновление)
Средняя погрешность $\bar{\varepsilon}$ , %	14,2	5,8
СКП содержания $\sigma_z$ , г/т	0,71	0,29
Доля блоков с $\delta > 15\%$ , %	38	9
Дисперсия кригинга $\sigma_K^2$ ср., (г/т) <sup>2</sup>	0,22	0,09

### Фактическое содержание Au по очистным блокам [5-7]

По 20 оцениваемым блокам среднее отклонение фактического содержания от планового составило  $\bar{\delta} = 4,7\%$ , СКП —  $\sigma_\delta = 3,2\%$ , что соответствует требованиям к оперативному планированию горных работ.

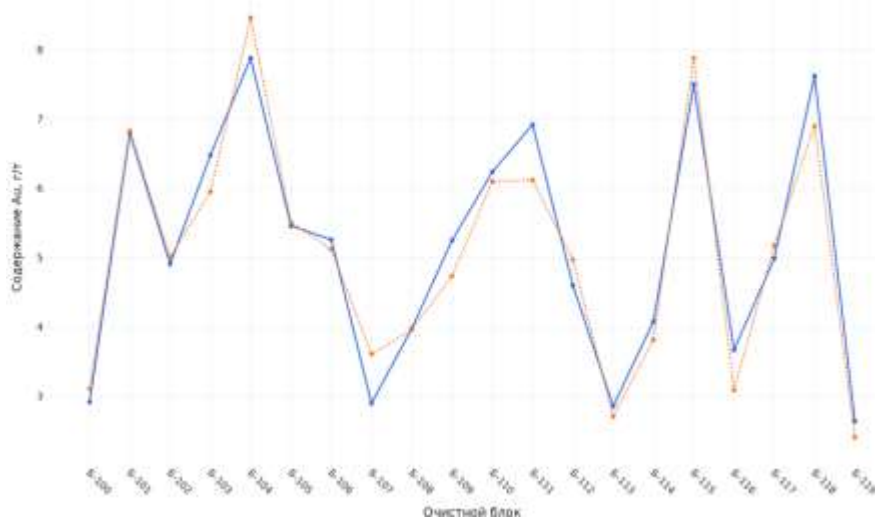


Рисунок 2 – Плановое и фактическое содержание Au по блокам

### Показатели разубоживания

После внедрения ЦДБ (с Q1 2023) разубоживание снизилось в среднем с 18,4% до 13,2% за 4 квартала применения, опустившись ниже норматива (15%) уже во II квартале 2023. Тренд снижения устойчивый: -1,2 п.п./квартал.

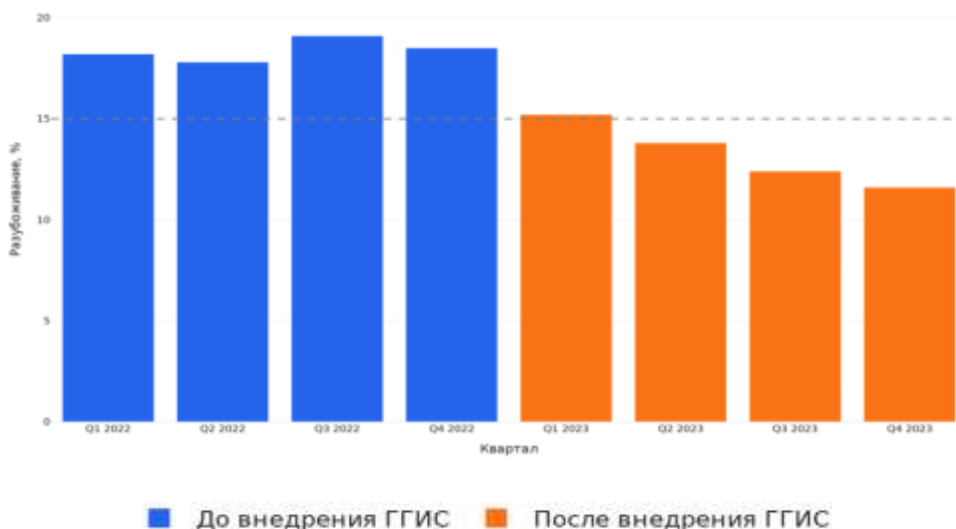
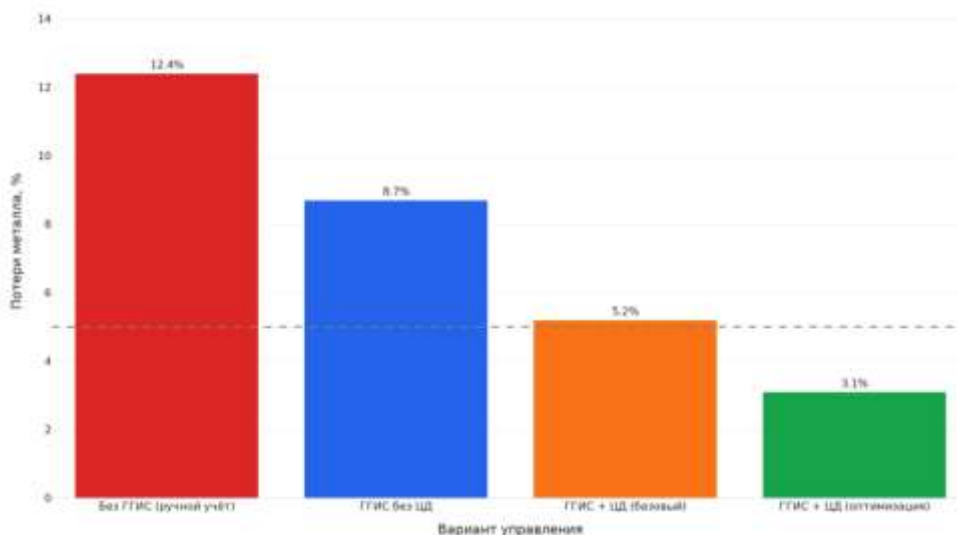


Рисунок 3- Разубоживание руды до и после ГГИС

### Потери металла по вариантам управления

Внедрение ГГИС с ЦДБ и последующей оптимизацией позволяет снизить потери металла с 12,4% (ручной учёт) до 3,1% (ГГИС + ЦДБ + оптимизация), что ниже отраслевого норматива 5%.



#### Рисунок 4- Потери металла по вариантам управления (сравнение)

##### Обсуждение

Расчёт экономического эффекта

Дополнительный выход металла при снижении потерь с 12,4% до 3,1%:

$$\Delta M = Q \cdot \bar{Z} \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{100} \quad (8)$$

$$\Delta M = 500\,000 \cdot 4,8 \cdot \frac{12,4 - 3,1}{100} = 500\,000 \cdot 4,8 \cdot 0,093 = 223\,200 \text{ г} = 223,2 \text{ кг Au}$$

При биржевой цене золота  $P = 6\,200$  руб./г экономический эффект:

$$E = \Delta M \cdot P = 223\,200 \times 6\,200 = 1\,383\,840\,000 \text{ руб.}$$

$$\approx 1,38 \text{ млрд руб./год} \quad (9)$$

Даже при учёте затрат на лицензионное ПО (7–12 млн руб./год), обучение персонала и сопровождение системы (5–8 млн руб./год), срок окупаемости составит менее одного месяца. Дополнительный эффект от снижения разубоживания (с 18,4% до 13,2%) — экономия на транспортировании, дроблении и измельчении пустой породы:[8-11]

$$E_{\text{разуб}} = \Delta D \cdot Q \cdot c_{\text{переработка}} = (0,184 - 0,132) \cdot 500\,000 \cdot 850 = 22,1 \text{ млн руб./год}$$

где  $c_{\text{переработка}} = 850$  руб./т — удельные затраты на переработку.

Таблица 3

Сравнительный анализ методов управления качеством

Параметр	Ручной учёт	ГГИС без ЦДБ	ГГИС + ЦДБ
Разубоживание, %	18–20	14–16	11–14
Потери металла, %	10–14	7–9	3–5
Время реакции на отклонение, ч	24–48	8–12	2–4
Охват добычного фронта, %	15–20	50–70	85–95
Погрешность оценки содержания, %	20–30	12–16	5–8
Затраты на систему, млн руб./год	1–2	8–12	12–20

##### Ограничения метода

Качество исходных данных: точность ЦДБ принципиально зависит от плотности и надёжности опробовательской сети; при шаге сети >40 м дисперсия кригинга  $\sigma_K^2$  возрастает до 0,4–0,6 (г/т)<sup>2</sup>, что существенно снижает ценность прогноза:[7]

Анизотропия рудного тела: для жильных месторождений необходимо применять анизотропные вариограммные модели — использование изотропной модели завышает  $\sigma_K^2$  на 15–25%;[5]

Временные задержки обновления: цикл обновления ЦДБ 4 ч оптимален при производительности блока 200–400 т/смену; при более высокой интенсивности требуется сокращение цикла до 2 ч.[4]

### *Заключение*

Представленная методология применения ГГИС и цифрового двойника блока обеспечивает переход от дискретного к непрерывному управлению качеством рудного потока при подземной разработке. Ключевые результаты:

Дисперсия кригинга при шаге сети 20–40 м:  $\sigma_K^2 = 0,09$  (г/т)<sup>2</sup> — снижение в 2,4 раза по сравнению со статичной моделью;

Разубоживание снизилось с 18,4% до 11,6% (-37%), потери металла — с 12,4% до 3,1% (-75%);

Погрешность оперативной оценки содержания ( $\bar{\delta} = 4,7\%$ ) соответствует требованиям I класса точности геолого-маркшейдерской документации;

Экономический эффект при производительности 500 тыс. т/год —  $\geq 1,4$  млрд руб./год, срок окупаемости системы — < 1 месяца.

Внедрение методики рекомендуется на подземных рудниках с производительностью  $\geq 200$  тыс. т/год при наличии сформированной базы данных опробования ( $\geq 500$  проб по рудному телу).

### References

1. Маниковский П. М. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС / П. М. Маниковский // Маркшейдерия и недропользование. — 2021. — № 4. — С. 45–52.

2. Макарова В. А. Динамическая система управления качеством минерального сырья / В. А. Макарова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 23. — С. 181–191. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-sistema-upravleniya-kachestvom-mineralnogo-syrya> (дата обращения: 14.04.2026).

3. Стадник Д. А. Повышение качества цифровых «двойников» горнодобывающих предприятий путём стандартизации атрибутивного наполнения для 3D геоинформационно-геотехнического моделирования / Д. А. Стадник, О. З. Габараев, Н. М. Стадник, К. Л. Григорян // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11-1. — С. 202–212. — <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212>.

4. Методика создания блочной модели рудных складов в ГГИС Micromine по данным АСУ ГТК Wenco [Электронный ресурс] / АО «Полус Красноярск». — Красноярск, 2022. — URL: <https://www.micromine.kz/wp-content/uploads/2022/09/9.-Micromine-OB.pdf> (дата обращения: 14.04.2026).

5. Корнилков С. В. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства / С. В. Корнилков, П. А. Рыбников, Л. С. Рыбникова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2025. — Т. 67, № 1. — С. 76–85. — <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85>.

6. Kamosho J. Foundations of Spatial Data Infrastructure for Underground Mining Operations / J. Kamosho // FIG Congress Proceedings. — Copenhagen : FIG, 2026. — TS08A. — URL: [https://fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2026/papers/ts08a/TS08A\\_kamosh\\_o\\_14121.pdf](https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2026/papers/ts08a/TS08A_kamosh_o_14121.pdf) (дата обращения: 14.04.2026).

7. Стадник Н. М. Основные методологические принципы формирования комплексной геоинформационной базы для прогнозирования и оценки запасов угля / Н. М. Стадник // Горная промышленность. — 2016. — № 3 (127). — С. 73–76.

8. Стадник Д. А. Обоснование функциональных подсистем единой отраслевой системы автоматизированного проектирования угольных шахт / Д. А. Стадник // Уголь. — 2017. — № 10 (1099). — С. 52–56.

9. Ключев Р. В. Горная разработка и оценка геолого-технических условий карьера «Северный» с использованием математических моделей / Р. В. Ключев, И. И. Босиков, Е. В. Егорова, О. А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — № 3. — С. 418–427.

10. Chimunhu P. The future of underground mine planning in the era of machine learning: Opportunities for engineering robustness and flexibility / P. Chimunhu, E. Topal, M. W. A. Asad, R. S. Faradonbeh, A. D. Ajak // Mining Technology. — 2024. — Vol. 134. — <https://doi.org/10.1177/25726668241281875>.

11. Oubeid N. Block model optimization and resource estimation of the Angouran Mine using indicator kriging and simple kriging methods / N. Oubeid // Journal of Mining and Environment. — 2022. — Vol. 13, No. 2. — P. 325–340. — URL: [https://jme.shahroodut.ac.ir/article\\_2400.html](https://jme.shahroodut.ac.ir/article_2400.html) (дата обращения: 14.04.2026).