

Геоинформатика. 2024. № 3. С. 76–82.
Geoinformatika. 2024;(3):73–82.

Решение практических задач

Научная статья
 УДК [622.12:553.494].004.94
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-3-76-82>

Применение блочного моделирования для прогноза изменчивости плотности титаномагнетитовой руды

© 2024 г. — Валерий Данилович Кантемиров^{a)}, Андрей Михайлович Яковлев^{b)}, Роман Сергеевич Титов^{c)}

ФГБУН Институт горного дела УрО РАН; Россия, г. Екатеринбург

^{a)}ukrkant@mail.ru, ^{b)}quality@igduran.ru, ^{c)}ukr07@mail.ru

Аннотация: В статье представлены результаты выполненных исследований с использованием технологий блочного моделирования для определения плотности титаномагнетитовой руды Северной залежи Гусевогорского месторождения, разрабатываемого ОАО «ЕВРАЗ КГОК». Изложены используемые методы лабораторных исследований образцов титаномагнетитовой руды из разведочных скважин эксплуатационной разведки. Представлены результаты статистической обработки полученных данных. Установлена взаимосвязь между плотностью руды и содержанием в ней железа. На основе блочного моделирования массива сделан прогноз для глубоких горизонтов Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» об изменении плотности руды и содержания в ней железа общего, что позволит специалистам предприятия использовать на практике полученные данные при геологических и технологических расчетах.

Ключевые слова: *титаномагнетитовая руда; плотность; ядро; отбор проб; инструментальные измерения; статистическая обработка данных; блочное моделирование.*

Для цитирования: Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение блочного моделирования для прогноза изменчивости объемного веса титаномагнетитовой руды // Геоинформатика. — 2024. — № 3. — С. 76–82. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-3-76-82>.

Practical application

Original article

The use of block modeling to predict the variability of the bulk weight of titanomagnetite ore

© 2024 — Valery D. Kantemirov^{a)}, Andrei M. Yakovlev^{b)}, Roman S. Titov^{c)}

Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Yekaterinburg, Russia

^{a)}ukrkant@mail.ru, ^{b)}quality@igduran.ru, ^{c)}ukr07@mail.ru

Abstract: The article presents the results of the performed studies using block modeling technologies to determine the volume weight of the titanium magnetite ore of the Northern deposit of the Gusevogorsky deposit, developed by EVRAZ KGOK OJSC. The methods used for laboratory studies of samples of titanium magnetite ore from exploration wells are described. The results of statistical processing of the obtained data are presented. The relationship between the bulk weight of the ore and the iron content in it has been established. Based on block modeling of the massif, a forecast was made for the deep horizons of the Northern Quarry of JSC EVRAZ KGOK on changes in the volume weight of ore and the total iron content in it, which will allow the company's specialists to use the obtained data in geological and technological calculations.

Key words: *titanium magnetite ore; bulk weight; core; sampling; instrumental measurements; statistical data processing; block modeling.*

For citation: Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. The use of block modeling to predict the variability of the bulk weight of titanomagnetite ore. *Geoinformatika*. 2024;(3):76–82. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-3-76-82>. In Russ.

Введение

Одной из важных горно-технологических характеристик полезного ископаемого (ПИ) является его объемный вес, или объемная плотность в естественном состоянии (тонн в кубическом метре в массиве). Этот показатель учитывается при подсчете и списании балансовых запасов ПИ в процессе разработки месторождения, при планировании горных работ и производительности горно-добывающего и обогатительного оборудования.

С 1955 г. значения объемной плотности при освоении Гусевогорского месторождения титаномагнетитов (ОАО «ЕВРАЗ КГОК») постоянно уточнялись, а с 2013 г. при обосновании постоянных разведочных кондиций приняты в среднем по всем трем карьерам в размере 3,4 т/м³. Однако в процессе разработки Северной залежи месторождения плотность добываемой руды с глубоких горизонтов Северного карьера перестала соответствовать принятым значениям к подсчету балан-

совых запасов (по данным геологической службы АО «ЕВРАЗ КГОК»). В связи с этим возникла необходимость в уточнении плотности руды.

В настоящее время лабораторией управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН проведен ряд исследований по уточнению объемного веса (объемной плотности) руды Северной залежи Гусевогорского месторождения в пределах Северного карьера Качканарского ГОКа (ОАО «ЕВРАЗ КГОК»).

Отбор проб для исследований проводился из керна скважин эксплуатационной разведки в Северном карьере ОАО «ЕВРАЗ КГОК». Использование эксплуатационной разведки для отбора проб позволяет обеспечить привязку результатов физико-механического исследования пород к скважинам геологического изучения рудного тела Северной залежи и получить дополнительную петрографическую информацию об отбираемых про-

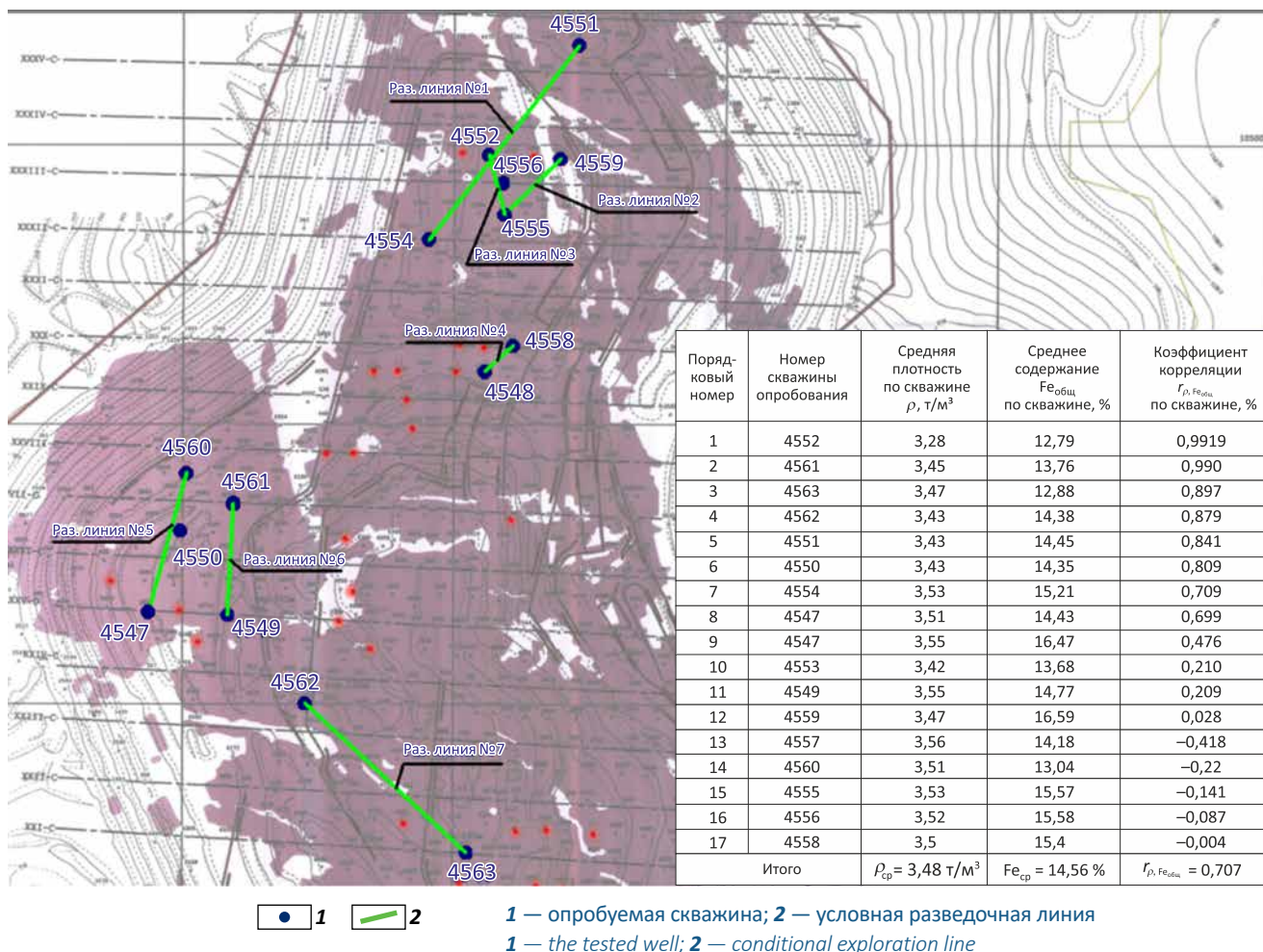
бах руды, в том числе для построения блочных моделей массива.

Массив исходных данных представлен интервальным опробованием 17 разведочных скважин эксплуатационной разведки (см. рис. 1). Среднее расстояние между скважинами 120 м, минимальное — 30 м, максимальное — 807 м, глубина скважин — 60 м. Для повышения точности моделирования было принято решение разбить весь массив на два участка с примерно одинаковым средним расстоянием, при моделировании использовано 194 представленных интервала опробования через каждые 5 м по глубине скважины. Исходные данные содержат информацию о координатах, значениях плотности, содержании железа общего и петрографической разности.

Скважины эксплуатационной разведки, предназначенные для отбора проб, сгруппированы в линейные профили по 2-3 точки (скважины) на

Рис. 1. Схема размещения в Северном карьере ОАО «ЕВРАЗ КГОК» скважин эксплуатационной разведки и условных разведочных линий

Fig. 1. Scheme of placement of production exploration wells and conditional exploration lines in the Northern Quarry of EVRAZ KGOK



каждом профиле (см. рис. 1). Шаг между профилями установлен по возможности равномерным с целью получения более полной информации в контуре оцениваемой площади.

Для определения плотности титаномагнетитовой руды Северной залежи, представляющей собой магматическую горную породу высокой прочности ($f = 13-16$ по шкале проф. Протождьяконова), был использован метод гидростатического взвешивания (в соответствии с ГОСТом 5180-84 и ГОСТом 5180-2015 [1-3]).

В процессе исследований установлено распределение значений плотности руды (см. рис. 2) и взаимосвязь полученной плотности с содержанием в руде железа общего ($Fe_{\text{общ}}$).

При статистическом анализе полученных данных [4] установлена прямая корреляционная зависимость между плотностью титаномагнетитовой руды (ρ) и общим содержанием в ней железа ($Fe_{\text{общ}}$), которая имеет следующий вид:

$$\rho = 2,9124 + 0,0387Fe_{\text{общ}}, r_{\rho, Fe_{\text{общ}}} = 0,707, \quad (1)$$

где $Fe_{\text{общ}}$ — общее содержание железа в руде, %; r — коэффициент корреляции.

На основе полученных результатов построена блочная модель распределения в массиве значений

плотности руды и содержания в ней железа общего (см. рис. 3).

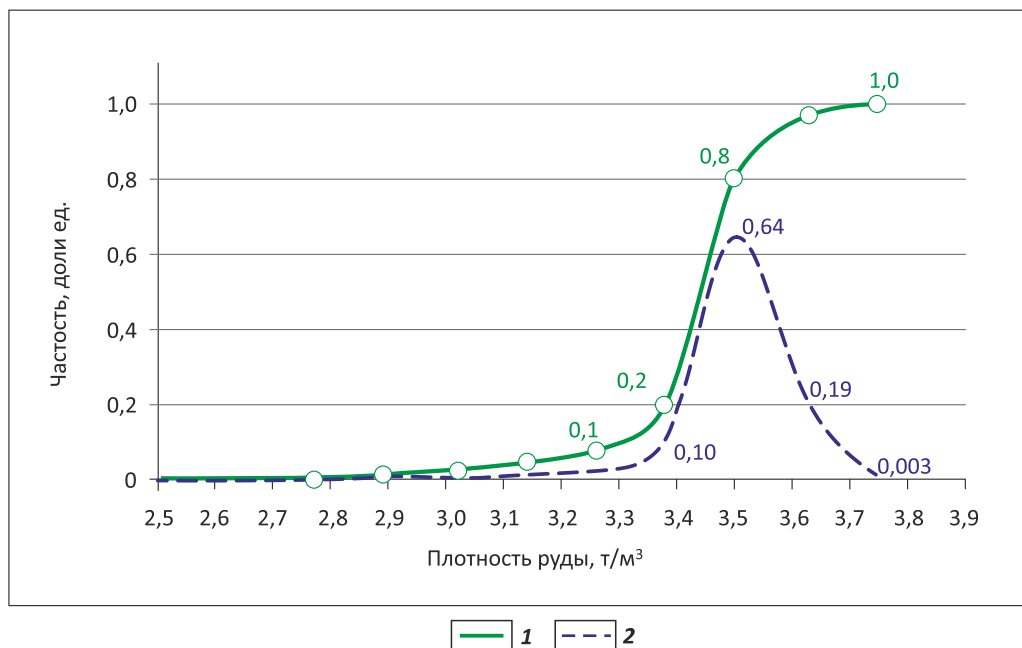
При построении блочной модели использовался специализированный программный комплекс моделирования Surpac с интерполяционными и экстраполяционными методами анализа в интервалах между соседними скважинами, создающими условную разведочную линию. Блочные модели для исследования показателей плотности руды и содержания в ней железа по глубине исследования и в плане создавались с размером блоков — $5 \times 5 \times 5$ м. Для построения разрезов использовались укрупненные блочные модели с размером блока $100 \times 100 \times 15$ м [5-9].

С использованием блочной модели и статистического анализа результатов исследований получены регрессионные зависимости $\rho = f(H_{\text{опр}})$ и $\rho = f(Fe_{\text{общ}})$, с помощью которых установлены прогнозные значения плотности в зависимости от глубины опробования ($H_{\text{опр}}$) массива титаномагнетитовой руды Северной залежи (см. таблица).

Регрессионная модель зависимости плотности от глубины опробования исследуемых образцов имеет вид:

$$\rho = 3,56 - 1,7 \cdot 10^{-8} H_{\text{опр}}^{-2,58} - 0,682 H_{\text{опр}}^{0,415} + 0,611 H_{\text{опр}}^{0,4375}, \quad r_{\rho, H_{\text{опр}}} = 0,99, \quad (2)$$

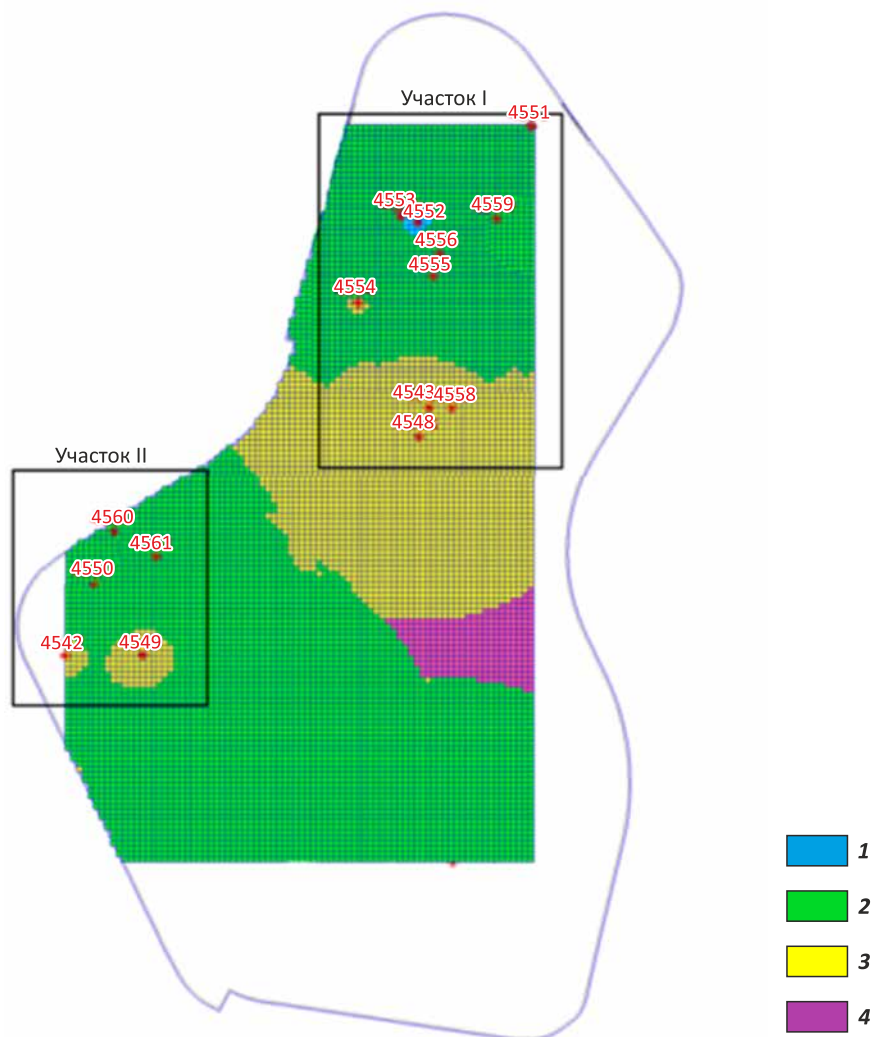
Рис. 2. Графики распределения плотности титаномагнетитовой руды Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК»
Fig. 2. Graphs of the volume weight distribution of titanium magnetite ore from the Northern quarry of EVRAZ KGOK



Кривые распределения: 1 — интегральная, 2 — дифференциальная
Distribution curve: 1 — integral 2 — discriminating

Рис. 3. Блочная модель распределения значений плотности титаномagnetитовой руды на исследуемых участках I и II Северного карьера

Fig. 3. Block model of the distribution of the volume weight of titanium magnetite ore in the studied sites I and II of the Northern Quarry



Плотность, т/м³ (1–3): 1 — от 3,1 до 3,4, 2 — от 3,4 до 3,5, 3 — от 3,5 до 3,6; 4 — недостаточно данных для точной интерполяции
Density, t/m³ (1–3) 1 — from 3,1 to 3,4, 2 — from 3,4 to 3,5, 3 — from 3,5 to 3,6; 4 — not enough data for accurate interpolation

где $H_{\text{опр}}$ — глубина опробования, м.

Уравнение регрессии (2) получено с использованием разработанной ИГД УрО РАН компьютерной программы «Тренды ФСП-1», предназначенной для расчета (по случайно распределенным значениям зависимой величины) и графического построения уравнений нелинейной регрессии, трендов, обладающих повышенной достоверностью, представленных в виде полиномов функций, параметры которых (показатели, коэффициенты, основания и т. д.) самоопределяются в процессе расчета. Погрешность оценки задается вычислительным алгоритмом программы, в пределах 0,01–0,02 т/м³.

Оцениваемые значения в блоках модели вычислялись методом обратного расстояния. В основе

метода лежит предположение о том, что чем меньше расстояние между оцениваемыми объектами, тем большее между ними существует сходство, а по мере удаления объектов друг от друга их связь ослабевает [10, 11]. Значение свойства Z (в нашем случае ρ — показатель плотности или $Fe_{\text{общ}}$ — железа общего) в искомой точке (x_0) будет наиболее сходно со значениями свойства в близлежащих опорных точках (x_i), и менее сходно со значениями в удаленных опорных точках:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x_0) Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i(x_0)}. \quad (3)$$

Таблица Прогнозные значения плотности (ρ) и содержания железа общего ($Fe_{\text{общ}}$) титаномагнетитовой руды Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (по результатам моделирования)

Table Forecast values of volume weight and total iron content of titanium magnetite ore of the Northern quarry of EVRAZ KGOK (based on simulation results)

| Горизонт отработки, м | Глубина оценки, м | Среднее значение плотности ρ , соответствующее глубине оценки, т/м ³ | Содержание общего железа $Fe_{\text{общ}}$ соответствующее глубине оценки, % |
|-----------------------|-------------------|--|--|
| +205 | 15,0 | 3,50 | 14,53 |
| +190 | 30,0 | 3,49 | 15,67 |
| +175 | 45,0 | 3,49 | 14,99 |
| +160 | 60,0 | 3,48 | 14,73 |
| +145 (дно карьера) | 75,0 | 3,47 | 14,57 |
| +130 | 90,0 | 3,48 | 14,57 |
| +115 | 105,0 | 3,48 | 14,61 |
| +100 | 120,0 | 3,48 | 14,56 |

В данном методе используется обратно пропорциональная зависимость весовых коэффициентов от некоторой степени расстояния (h_i) между расчетной точкой (x_0) и точкой с известным значением оцениваемой характеристики (x_i):

$$w_i(x_0) = \frac{1}{h_i^\beta} \Big/ \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j^\beta}, \quad (4)$$

где β – степень (обычно принимают 1, 2 или 3);

$$h_i = \sqrt{d_i^2 + \delta^2};$$

d_i – расстояние между точками x_i и x_0 ;

δ – сглаживающий параметр.

Максимальный радиус поиска для интерполяции данных методом обратного расстояния задавался в программе Surgras исходя из двойного среднего расстояния между скважинами (среднее расстояние между скважинами – 120 м), а степень обратного расстояния принята равной 1 (единице) для минимизации среднеквадратичной ошибки интерполяции.

На рис. 4 представлен результат блочного моделирования ρ и $Fe_{\text{общ}}$ на одном из участков Северного карьера по данным опробования 9 скважин.

На основе блочных моделей по 7 выделенным разведочным линиям в границах исследуемых участков Северного карьера построены условные разрезы (рис. 5) и выполнен прогноз изменчивости характеристик руды (ρ и $Fe_{\text{общ}}$) на участках карьера с пройденными скважинами эксплуатационной разведки.

Выполненные исследования по определению плотности титаномагнетитовой руды Северной залежи Гусевогорского месторождения на основе изучения 194 проб керна рудного материала из скважин эксплуатационной разведки позволили с большой достоверностью определить фактическую плотность руды и сделать прогноз о ее характеристиках для глубоких горизонтов карьера. Высокая точность результатов измерений достигнута за счет использования метода гидростатического взвешивания при определении плотности образцов руды и технологий блочного моделирования для получения прогнозных значения для глубоких горизонтов карьера.

Выводы

В результате исследований установлены линейная зависимость и положительный коэффициент корреляции между плотностью титаномагнетитовой руды и содержанием в ней железа общего с неявной тенденцией к росту значений плотности руды с увеличением глубины опробования. Коэффициент корреляции между плотностью руды и содержанием в ней железа общего составил 0,707, что в соответствии с общей классификацией корреляционных связей означает тесную связь ($r \geq 0,70$). Установленное среднее значение плотности руды (ρ) Северной залежи составило 3,48 т/м³ при среднем содержании железа общего ($Fe_{\text{общ}}$) 14,6 %.

Используемая методика исследований позволяет распространить полученное значение плотности на весь рудный массив Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» и рекомендовать его в качестве параметра, применяемого при выполнении геологических и технологических расчетов.

Рис. 4. Блочная модель распределения изучаемых характеристик (ρ и $Fe_{\text{общ}}$) исследуемого участка Северной залежи ОАО «ЕВРАЗ КГОК»

Fig. 4. Block model of the distribution of the studied characteristics of the studied section of the Northern deposit of EVRAZ KGOK

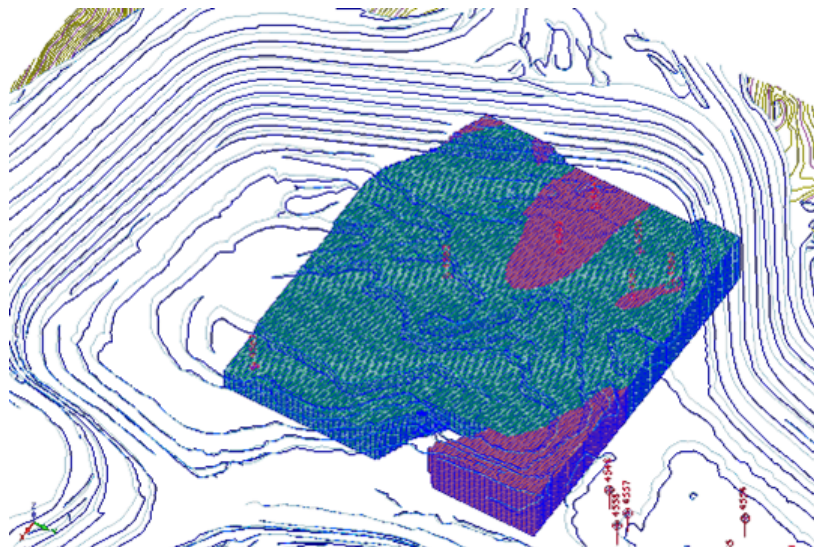
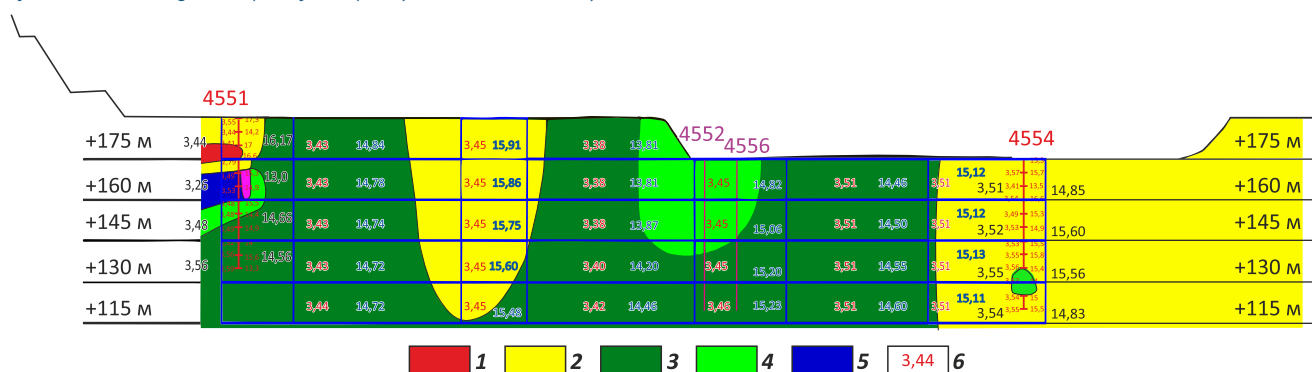


Рис. 5. Условный разрез, пример по первой разведочной линии, распределения плотности руды с ее привязкой к распределению содержания $Fe_{\text{общ}}$ по глубине исследуемого участка карьера

Fig. 5. A conditional section, an example along the first exploration line, of the distribution of ore density with its reference to the distribution of Fe content along the depth of the quarry section under study



Участки с содержанием $Fe_{\text{общ}}$, % (1–3): 1 — > 16 , 2 — от 15 до 16, 3 — от 14 до 15; 4 — от 13 до 14; 5 — < 13 ; 6 — плотность руды, т/м³

Plot with a Fe content, % (1–3): 1 — $> 16\%$, 2 — of 15 to 16%, 3 — of 14 to 15%; 4 — of 13 to 14%; 5 — $< 13\%$; 6 — ore density, t/m³

Статья подготовлена по материалам НИР. Тема 1. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Список источников

- ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2016. — 19 с.
- ГОСТ 22733-2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. — М.: Центр проектной продукции в строительстве, 2003. — 19 с.
- ГОСТ 30416-2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 16 с.
- ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — М.: Стандартинформ, 2013. — 18 с.
- Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Геоинформационные технологии при моделировании качественных характеристик руд // Геоинформатика. — 2019. — № 3. — С. 12–18.
- Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых Гусевогорского месторождения // Литосфера. — 2014. — № 5. — С. 122–128.
- Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4. — С. 170–176.
- Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования // Геоинформатика. — 2020. — № 3. — С. 29–37. DOI: 10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.

9. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов — новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 5–14.
10. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геоинформатика и геоинформационные системы. – М. : ВНИИгеосистем, 2005. – 453 с.
11. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. – М. : Наука, 2010. – 327 с.

References

1. GOST 5180-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik [GOST 5180-2015. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics.]. Moscow: Standartinform; 2016. 19 p.
2. GOST 22733-2002. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noi plotnosti [GOST 22733-2002. Soils. Method for laboratory determination of maximum density.]. – Moscow: Tsentr proektnoi produktsii v stroitel'stve; 2003. 19 p.
3. GOST 30416-2012. Grunty. Laboratornyye ispytaniya. Obshchie polozheniya [GOST 30416-2012. Soils. Laboratory tests. General provisions]. Moscow: Standartinform, 2013. 16 p.
4. GOST 20522-2012. Grunty. Metody statisticheskoi obrabotki rezul'tatov ispytaniy [GOST 20522-2012. Soils. Methods for statistical processing of test results]. Moscow: Standartinform, 2013. 18 p.
5. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Geoinformation technologies in the modeling of qualitative characteristics of ores. *Geoinformatika*. 2019;(3):12–18.
6. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M. Geoinformation assessment of quality variation titanmagnetite ore in Gusevogorsk deposit. *Lithosphere (Russia)*. 2014;(5):122–128.
7. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Computer simulation potentialities for solving questions of mineral resources quality management. *Problems of Subsoil Use*. 2016;(4):170–176.
8. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Estimation of quality indicators of mineral resources using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatika*. 2020;(3):29–37. DOI: 10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
9. Yakovlev V.L. The study of transient processes as a new methodological approach to the development of innovative technologies for extraction and ore preparation of mineral raw materials mining deepseated complex-structured deposits. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(2):5–14.
10. Kuznetsov O.L., Nikitin A.A., Cheremisina E.N. Geoinformatika i geoinformatsionnyye sistemy [Geoinformatics and geographic information systems]. Moscow: VNIIGeosistem; 2005. 453 p.
11. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice]. М. : Nauka; 2010. 327 p.

Статья поступила в редакцию 25.06.2024 г., одобрена после рецензирования 15.08.2024 г., принята к публикации 20.09.2024 г.
The article was submitted 25.06.2024; approved after reviewing 15.08.2024; accepted for publication 20.09.2024.

Информация об авторах

Кантемиров Валерий Данилович

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией
Управления качеством минерального сырья
Институт горного дела УрО РАН
620075 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: ukrkant@mail.ru
AuthorID: 179367
ResearcherID: G-6216-2014

Яковлев Андрей Михайлович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт горного дела УрО РАН
620075 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: quality@igduran.ru
ORCID: 0000-0001-8285-6387
AuthorID: 618658

Титов Роман Сергеевич

Старший научный сотрудник
Институт горного дела УрО РАН
620075 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: ukr07@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3569-2743
AuthorID: 179369
ResearcherID: G-6254-2014

Information about authors

Valery D. Kantemirov

Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Quality
Management of Mineral Raw Materials
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences
58, Mamin-Sibiryak str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: ukrkant@mail.ru
AuthorID: 179367
ResearcherID: G-6216-2014

Andrei M. Yakovlev

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences
58, Mamin-Sibiryak str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: quality@igduran.ru
ORCID: 0000-0001-8285-6387
AuthorID: 618658

Roman S. Titov

Senior Researcher
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences
58, Mamin-Sibiryak str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: ukr07@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3569-2743
AuthorID: 179369
ResearcherID: G-6254-2014