

УДК [622.12:553.494].004.94

**О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ВЕСА РУДЫ ПО ГЛУБИНЕ
ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)**

В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: ukrkant@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Представлены результаты исследований по определению объемного веса титаномагнетитовой руды Северной залежи Гусевогорского месторождения. Установлена взаимосвязь между объемным весом руды и содержанием в ней железа. На основе блочного моделирования массива сделан прогноз для глубоких горизонтов Северного карьера ОАО “ЕВРАЗ КГОК” об изменении объемного веса руды и содержания в ней железа общего, что позволит специалистам предприятия использовать на практике полученные данные при геологических и технологических расчетах.

Титаномагнетитовая руда, объемный вес, керн, отбор проб, инструментальные измерения, статистическая обработка данных, блочное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20170615

Одной из важных горно-технологических характеристик полезного ископаемого является его объемный вес или объемная плотность в естественном состоянии. Этот показатель учитывается при подсчете и списании балансовых запасов полезных ископаемых в процессе разработки месторождения, при планировании горных работ и производительности горнодобывающего и обогатительного оборудования.

При освоении Гусевогорского месторождения (г. Качканар, Свердловская обл.) титаномагнетитов значения объемной плотности постоянно уточнялись [1–5], а с 2013 г. при обосновании постоянных разведочных кондиций приняты в среднем по всем трем карьерам в размере 3.4 т/м^3 . Однако в процессе разработки Северной залежи месторождения объемный вес добываемой руды с глубоких горизонтов Северного карьера перестал соответствовать принятым к подсчету значениям балансовых запасов (по данным геологической службы АО “ЕВРАЗ КГОК”).

В 2016 г. сектор управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН выполнил ряд исследований по уточнению объемного веса (плотности) руды Северной залежи Гусевогорского месторождения в пределах Северного карьера Качканарского ГОКа. Отбор проб проводился

Исследования выполнены в рамках проектов № 15-11-5-7 “Исследование переходных процессов и учет закономерностей их развития при разработке инновационных технологий оценки, добычи и рудоподготовки минерального сырья” и № 15-11-2345-27 “Освоение недр Земли: разработка ГИС и комплексных методов оценки и технологической подготовки к глубокой переработке руд для развития минерально-сырьевой базы горно-металлургического комплекса Урала”.

из керна скважин эксплуатационной разведки в Северном карьере, что позволяло обеспечить привязку результатов физико-механического исследования пород к скважинам геологического изучения рудного тела и получить дополнительную петрографическую информацию об отбираемых пробах руды для построения блочных моделей массива.

Массив исходных данных представлен интервальным опробованием 17 разведочных скважин эксплуатационной разведки (рис. 1). Среднее расстояние между скважинами 120 м, минимальное 30, максимальное 807 м, глубина скважин 60 м. Для повышения точности моделирования весь массив был разбит на два участка с примерно одинаковым средним расстоянием, использованы 194 интервала опробования через каждые 5 м по глубине скважины. Исходные данные включают информацию о координатах, значениях объемного веса по скважине, содержании железа общего и петрографической разности.

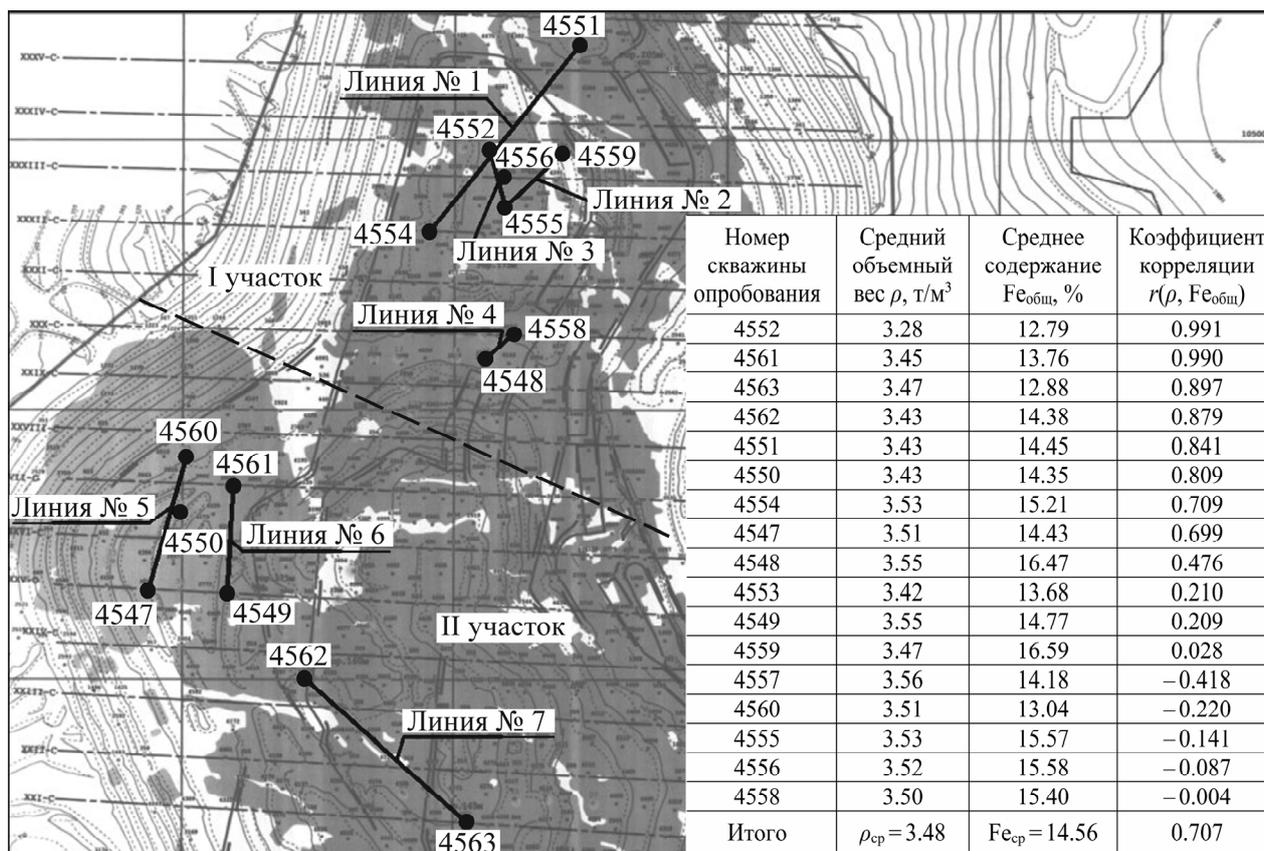


Рис. 1. Схема размещения в Северном карьере ОАО “ЕВРАЗ КГОК” скважин эксплуатационной разведки и условных разведочных линий № 1–7

Скважины эксплуатационной разведки, предназначенные для отбора проб, сгруппированы в линейные профили по 2–3 точки (скважины) на каждом профиле (рис. 1). Шаг между профилями установлен по возможности равномерным, с целью получения более полной информации в контуре оцениваемой площади.

Для определения объемного веса титаномагнетитовой руды Северной залежи, представляющей собой магматическую горную породу высокой прочности ($f = 13 - 16$ по шкале Протодьяконова), использован метод гидростатического взвешивания [6–8]. В процессе исследований установлено распределение значений объемного веса руды (рис. 2) и его взаимосвязь с содержанием в руде железа общего Fe_{общ}.

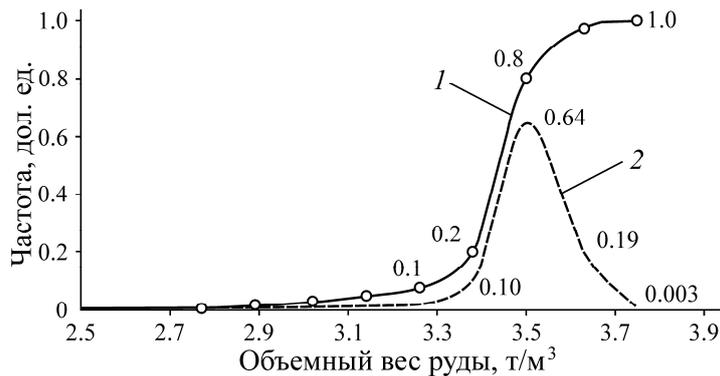


Рис. 2. Распределение объемного веса титаномагнетитовой руды Северного карьера ОАО “ЕВРАЗ КГОК”: 1 — интегральная кривая распределения; 2 — дифференциальная кривая распределения

При статистическом анализе данных [9] выявлена прямая корреляционная зависимость между объемным весом титаномагнетитовой руды ρ и общим содержанием в ней железа $Fe_{\text{общ}}$: $\rho = 2.9124 + 0.0387Fe_{\text{общ}}$, $r_{\rho, Fe_{\text{общ}}} = 0.707$ ($Fe_{\text{общ}}$ — общее содержание железа в руде, %; r — коэффициент корреляции). Коэффициент корреляции между объемным весом руды и содержанием в ней железа общего, согласно общей классификации корреляционных связей, означает их тесную связь ($r \leq 0.7$). Установленное среднее значение объемного веса руды ρ Северной залежи составило 3.48 т/м^3 при среднем содержании $Fe_{\text{общ}} = 14.6\%$.

По полученным результатам построена блочная модель распределения в массиве магматического месторождения объемного веса титаномагнетитовой руды и содержания в ней железа общего. При построении модели использовался специализированный программный комплекс моделирования Sigras с интерполяционными и экстраполяционными методами анализа в интервалах между соседними скважинами, создающими условную разведочную линию. Блочные модели широко применяются для выделения зон по какому-либо качественному или технологическому признаку, прогноза потерь и засорения, построения разрезов и планов горных работ, характеризующих оцениваемые варианты отработки месторождения и прогнозируемого качества извлекаемого полезного ископаемого и других горнотехнических, геологических, гидрогеологических задач. При создании достоверных блочных моделей учитывается фактор анизотропии массива горных пород (различие свойств горных пород в разных направлениях). Точность и достоверность геометризации зависит от предварительно проведенных геостатистических исследований [10–12]. Блочные модели для изучения показателей объемного веса руды и содержания в ней железа по глубине и в плане создавались с размером блоков $5 \times 5 \times 5 \text{ м}$. Для построения разрезов использовались укрупненные блочные модели с размером блока $100 \times 100 \times 15 \text{ м}$ [13].

На основе 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 объемного веса в зависимости от глубины опробования $H_{\text{опр}}$ массива титаномагнетитовой руды Северной залежи (таблица). Регрессионная модель зависимости объемного веса от глубины опробования исследуемых образцов: $\rho = 3.56 - 0.682H_{\text{опр}}^{0.415} + 0.611H_{\text{опр}}^{0.4375}$, $r_{\rho, H_{\text{опр}}} = 0.99$.

Прогнозные значения объемного веса и содержания железа общего титаномагнетитовой руды Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (по результатам моделирования)

Горизонт отработки, м	Глубина оценки, м	Среднее значение объемного веса ρ соответствующее глубине оценки, т/м ³	Содержание железа Fe _{общ.} соответствующее глубине оценки, %
+205	15	3.46	14.53
+190	30	3.47	15.67
+175	45	3.48	14.99
+160	60	3.49	14.73
+145 (дно карьера)	75	3.51	14.57
+130	90	3.52	14.57
+115	105	3.54	14.61
+100	120	3.55	14.56

Оцениваемые значения в блоках модели вычислялись методом обратного расстояния. В основе метода лежит предположение о том, что чем меньше расстояние между объектами, тем большее между ними существует сходство, а по мере удаления объектов друг от друга их связь ослабевает. Значение свойства Z (в нашем случае ρ — показатель плотности или Fe_{общ.}) в иско-мой точке x_0 будет наиболее сходно со значениями свойства в близлежащих опорных точках x_i и менее сходно со значениями в удаленных опорных точках:

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

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

$$w_i(x_0) = \frac{1}{h_i^\beta},$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j^\beta},$$

где β — степень, обычно принимается 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 Surpac исходя из двойного среднего расстояния между скважинами (среднее расстояние между скважинами 120 м), а степень обратного расстояния принята равной 1 для минимизации среднеквадратичной ошибки интерполяции.

На рис. 3 представлен результат блочного моделирования ρ и Fe_{общ.} на I оцениваемом участке (см. рис. 1) Северного карьера по данным опробования [14].

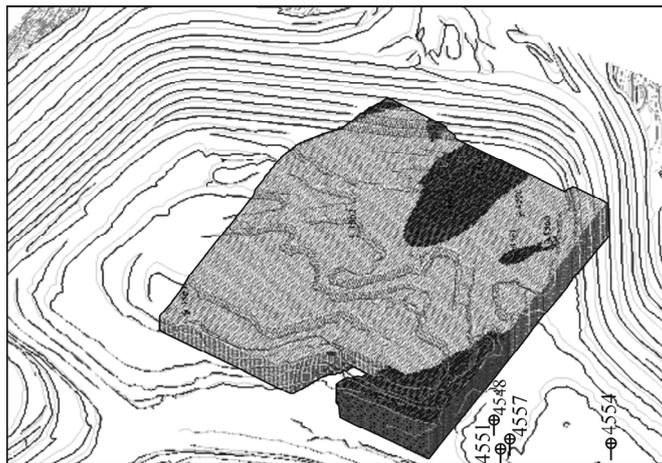


Рис. 3. Блочная модель распределения исследуемых характеристик ρ и $Fe_{общ}$ I участка Северной залежи

На основе блочных моделей построены разрезы (рис. 4) и выполнен прогноз изменчивости характеристик руды ρ и $Fe_{общ}$ на участках карьера с пройденными скважинами эксплуатационной разведки.

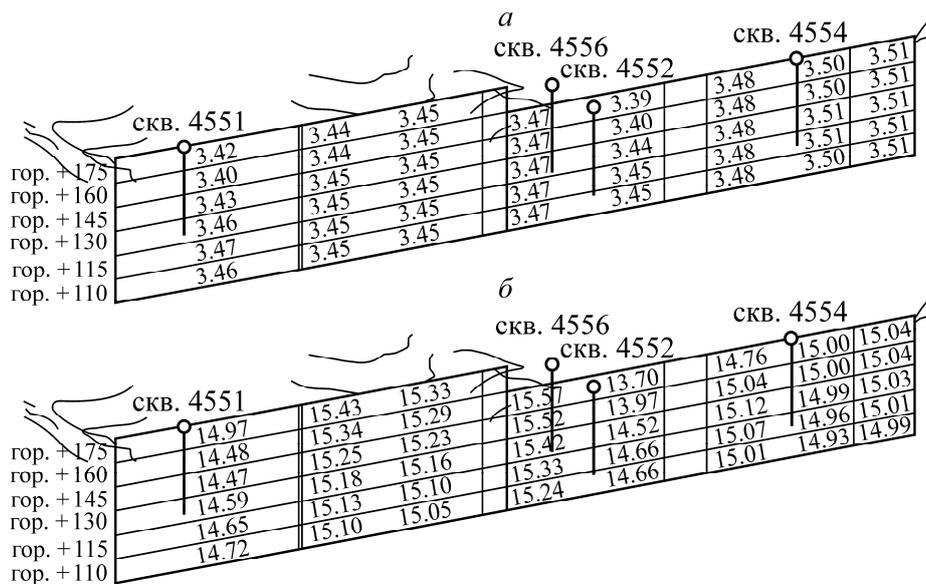


Рис. 4. Разрезы по разведочной линии 1, полученные на основании построенной блочной модели: *а* — распределение объемного веса с глубиной; *б* — распределение показателя содержания железа общего

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования по определению объемного веса титаномагнетитовой руды Северной залежи Гусевогорского месторождения на основе изучения 194 керновых проб рудного материала из скважин эксплуатационной разведки позволили с большой достоверностью рассчитать фактический объемный вес руды и сделать прогноз о ее характеристиках для глубоких горизонтов карьера. Высокая точность результатов измерений достигнута за счет использования метода гидростатического взвешивания образцов руды и технологий блочного моделирования для получения прогнозных значений для глубоких горизонтов карьера.

Установлена линейная зависимость и положительный коэффициент корреляции между объемным весом титаномагнетитовой руды и содержанием в ней железа общего с не явной тенденцией к росту значений объемного веса руды с увеличением глубины опробования (около 3 % на горизонт).

Доработана методика геометризации массива титаномагнетитовых руд с учетом данных эксплуатационной разведки. Такая методика позволяет полученное значение объемного веса распространить на весь рудный массив Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» и рекомендовать его в качестве параметра, применяемого при выполнении геологических и технологических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Резниченко В. А., Шабалин Л. И.** Титаномагнетит. Месторождения, металлургия, химическая технология. — М.: Наука, 1986. — 294 с.
2. **Худов С. В., Самойлов П. И.** Геологическое строение и комплексная оценка Гусевогорского месторождения // Горн. журн. — 1993. — № 3. — С. 7–8.
3. **Борисенко Л. Ф., Усков Е. Д.** Перспективы расширения комплексного использования титаномагнетитовых руд качканарского типа // Горн. журн. — 1993. — № 3. — С. 11–13.
4. **Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.** Методология оценки перспективной парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 177–187.
5. **Фоминых В. Г., Хвостова В. П.** Особенности распределения металлов группы платины в породообразующих минералах Гусевогорского месторождения // ДАН СССР. — 1971. — Т. 200. — № 2. — С. 443–445.
6. **Грунты.** Методы лабораторного определения физических характеристик: ГОСТ 5180–2015. — М.: Стандартинформ, 2016. — 19 с.
7. **Грунты.** Метод лабораторного определения максимальной плотности: ГОСТ 22733–2002. — М.: Центр проектной продукции в строительстве, 2003. — 19 с.
8. **Грунты.** Лабораторные испытания. Общие положения: ГОСТ 30416–2012. — М.: Стандартинформ, 2013. — 16 с.
9. **Грунты.** Методы статистической обработки результатов испытаний: ГОСТ 20522–2012. — М.: Стандартинформ, 2013. — 18 с.
10. **Pitombo C. S., Costa A. S. G., Salgueiro A. R.** Proposal of a sequential method for spatial interpolation of mode choice, *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2015, Vol. 21. — P. 3–5.
11. **Yangbo Xu, Donglin Dong, Guobin Duan, Xuetao Yu, Zhiwei Yu, Wei Huang.** Geostatistical analysis of soil nutrients based on GIS and geostatistics in the typical plain and hilly-ground area of zhongxiang, hubei province, *Open J. of Soil Science*, 2013, Vol. 3, No. 5. — P. 218–224.
12. **Changik Han, Ende Wang, Jianming Xia, Sunggi Yun.** Application of multi-gene genetic programming in kriging interpolation, *J. of Geoscience and Environment Protection*, 2015, Vol. 3, No. 5. — P. 27–34.
13. **Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С.** Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // Проблемы недропользования [Электронный ресурс]: рецензируемое сетевое периодическое научное издание ИГД УрО РАН. — 2016. — № 4. Режим доступа: [//trud.igduran.ru](http://trud.igduran.ru).
14. **Яковлев В. Л., Лаптев Ю. В., Яковлев А. М.** Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения // Литосфера. — 2014. — № 5. — С. 122–128.

Поступила в редакцию 31/VII 2017