

УДК 519.72:553.311.2

Антонов Владимир Александрович

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: Antonov@igduran.ru

**МЕТОД ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО
ОТОБРАЖЕНИЯ КАЧЕСТВА
ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ****Аннотация:*

Изложен метод геоинформационного отображения качества ванадийсодержащей малотитанистой магнетитовой руды. Показано на примере Гусевогорского месторождения магнетитов, что данным методом выделяются в геопространстве его участки по предложенному признаку качества руды – комплексному экономическому показателю. Этот показатель выражает интегрированное воздействие параметров руды на относительную прибыль, получаемую в итоге ее добычи, обогащения и реализации полученной продукции. Картирование качества руды по данному методу дает возможность эффективно планировать горные работы и управлять ими.

Ключевые слова: руда, качество, комплексный экономический показатель, прибыль, геоинформационное отображение

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.005

Antonov Vladimir A.

Chief researcher,
Doctor of technical sciences,
The Institute of Mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg, 58, Mamin-Sibiryak st.
e-mail: Antonov@igduran.ru

**THE METHOD OF GEO-INFORMATIONAL
DISPLAYING TITANIUM-MAGNETITE
ORE QUALITY***Abstract:*

The method of geo-informational displaying vanadium-containing small-titanium magnetite ore quality is cited. It is shown that its areas in geo-space are allocated by this method in terms of the proposed ore quality that is an integrated economic indicator, the Gusevogorsky magnetite deposit being an example. This indicator manifests the integrated influence of ore parameters on relative profit at the end of its mining, enrichment and final product realization. Ore quality mapping according to this method makes it possible to plan and control mining operations efficiently.

Key words: ore, quality, integrated economic indicator, profit, GIS mapping

Введение. В условиях дефицита в металлургии Уральского региона концентрированных руд основным минерально-сырьевым источником получения железа являются небогатые (16 – 18 % Fe), но крупные по запасам месторождения малотитанистых ванадийсодержащих магнетитов. Освоению месторождений благоприятствует их широкое распространение, сравнительно простое геологическое строение, возможность карьерной отработки, а также применение технологии обогащения, позволяющей получать ванадиевый титаномagnetитовый концентрат и выходную продукцию в виде агломерата и окатышей.

Для управления добычи руды на обозначенных месторождениях важным является геоинформационное отображение ее качества, то есть количественное, координированное в геопространстве оценивание свойств руды, определяющих возможную эффективность ее технологической переработки и реализации полученной продукции. Свойства руды выражаются набором химических и структурных параметров. Основными из них являются содержания в руде железа C_{FeM} , связанного с магнетитом 8 – 12,5 %, пентоксида ванадия C_V 0,08 – 0,25 %, диоксида титана C_{Ti} 0,5 – 2 % и размер d вкрапленных зерен магнетита 0,01 – 8 мм. Эти параметры влияют на качество руды и, следовательно, на конечный результат горно-обогатительного производства по-разному. Изменение содержания железа, находящегося в магнитной фракции, а также размера зерен магнетита в

* Статья публикуется в порядке обсуждения

значительной степени влияет на эффективность дробления руды и последующей магнитной сепарации. Это приводит к соответствующим изменениям себестоимости обогащения. Содержащиеся в руде ванадий и титан из-за изоморфной и минералогической связи с магнетитом переходят в концентрат и выходную продукцию. Здесь ванадий является ценным компонентом, поскольку в дальнейшем процессе металлургической переработки выходной продукции попутно извлекается из образующихся шлаков как самостоятельный продукт назначения, в то время как титан является вредной тугоплавкой примесью, осложняющей металлургическую переработку.

В связи с магнитным методом обогащения руды направление горных работ по ее добыче ориентируют главным образом на участки, выделенные на горизонтальном плане площадного распределения магнетитового железа C_{FeM} . Для дополнительной ориентации создаются, например, в работе [1], отдельные планы распределений в геопространстве других упомянутых рудных параметров C_V , C_{Ti} , и d . Однако при координированном совмещении этих планов в комплексной интерпретации качества руды возникает непреодолимое затруднение. Оно состоит в том, что совокупность значений отдельно картированных рудных параметров не дает целостного представления о совместном их влиянии на эффективность ее дальнейшего обогащения и реализацию полученной продукции, определяющих конечный экономический результат добычи руды на выделенном участке.

В данной статье для решения отмеченной проблемы предлагается эконометрический метод геоинформационного отображения качества титаномагнетитовой руды. Метод включает в себя совокупность следующих приемов и операций. Формируется математическая модель комплексного экономического показателя руды (КЭПр) как функция ее качества, определяющая по набору рудных параметров относительный результат добычи, переработки руды и реализации полученной продукции. Проводится расчет показателя КЭПр в координированных узловых точках геопространства по данным геофизических и геологических измерений рудных параметров. По метрической матрице узловых точек строится картографическая модель качества руды, показывающая распределение показателя КЭПр в геопространстве залежи титаномагнетитов.

Математическая модель КЭПр. При моделировании принята идея: создать показатель качества руды, отображающий в относительном виде зависимость экономического результата, полученного при реализации выходной продукции, от основных рудных параметров. В связи с этим определено, что КЭПр – это отношение условной прибыли Π , полученной от реализации продуктов обогащения руды (концентрата, агломерата, окатышей), поступившей на передел с естественными параметрами по содержаниям окисей титана C_{Ti} , ванадия C_V , железа C_{FeM} и размеру вкраплений магнетита d к условной прибыли Π_0 , полученной от реализации таких же продуктов обогащения руды, поступившей на передел с соответствующими параметрами C_{Ti0} , C_{V0} , C_{Fe0} , d_0 нормальной кондиции. Здесь под нормальной кондицией понимается обоснованный набор рудных параметров, усредненных по объему естественного залегания руды и обеспечивающих устойчивую ее переработку и плановый выход готовой продукции. Это руда малотитанистая, средняя по вкрапленности и обогатимости. Таким образом, КЭПр выражается соотношением функции $\Pi(C_{Ti}, C_V, C_{FeM}, d)$ к ее частному значению Π_0 :

$$КЭПр = \frac{\Pi(Ti, V, FeM, d)}{\Pi_0(Ti_0, V_0, FeM_0, d_0)} \quad (1)$$

В модели принята следующая структура влияния на КЭПр рудных параметров. На цену Π концентрата, агломерата и окатышей предусмотрено влияние содержаний в руде окисей титана C_{Ti} и ванадия C_V . Себестоимость обогащения $C_{об}$ руды зависит от содержания в ней железа C_{FeM} и размера вкраплений магнетита d . Положив себестоимость добычи руды $C_{доб}$ условно постоянной величиной, выразим прибыль разностью

$$\Pi = \Pi(Ti, V) - C_{об}(FeM, d) - C_{доб} \quad (2)$$

Таблица 1

Интервалы изменения параметров руды и функций их влияния

Параметры руды	Функции влияния	Значения параметров руды и функций влияния		
		Руда с параметрами ниже нормальной кондиции КЭПр < 100 %	Руда с параметрами нормальной кондиции КЭПр = 100 %	Руда с параметрами выше нормальной кондиции КЭПр > 100 %
Содержание двуокиси титана C_{Ti}	Φ_{Ti}	$1,23 \% < C_{Ti} \leq 1,6 \%$. Ц снижается на 7 %	$C_{Ti0} = 1,23 \%$, $Ц = Ц_0$	$0,9 \% \leq C_{Ti} < 1,23 \%$. Ц повышается на 7 %
		$-0,07 \leq \Phi_{Ti} < 0$	$\Phi_{Ti} = 0$	$0 < \Phi_{Ti} \leq 0,07$
Содержание пентоксида ванадия C_V	Φ_V	$0,1 \% \leq C_V < 0,145 \%$. Ц снижается на 5 %	$C_{V0} = 0,145 \%$ $Ц = Ц_0$	$0,145 \% < C_V \leq 0,2 \%$. Ц повышается на 5 %
		$-0,05 \leq \Phi_V < 0$	$\Phi_V = 0$	$0 < \Phi_V \leq 0,05$
Содержание железа магнитного C_{FeM}	Φ_{FeM}	$8,25 \% \leq C_{FeM} < 10,21 \%$. $C_{об}$ повышается на 10 %	$C_{Fe0} = 10,21 \%$ $C_{об} = C_{об0}$	$10,21 \% < C_{FeM} \leq 11,73 \%$. $C_{об}$ снижается на 10 %
		$0 < \Phi_{FeM} \leq 0,1$	$\Phi_{FeM} = 0$	$-0,1 \leq \Phi_{FeM} < 0$
Размер вкраплений магнетита d	Φ_d	$0,075 \text{ мм} \leq d < 2 \text{ мм}$. $C_{об}$ повышается на 10 %	$d_0 = 2 \text{ мм}$ $C_{об} = C_{об0}$	$2 \text{ мм} < d \leq 5 \text{ мм}$. $C_{об}$ снижается на 10 %
		$0 < \Phi_d \leq 0,1$	$\Phi_d = 0$	$-0,1 \leq \Phi_d < 0$

Интервалы изменения КЭПр зависят от установленных рудных кондиций, технологических режимов дробильно-обогащительного передела и системы ценообразования выходной продукции, принятой на горном предприятии, осваивающем месторождение титаномагнетитов. При этом зависимость цены Ц и себестоимости $C_{об}$ от рудных параметров выражается в относительном виде знакопеременными функциями влияния, соответственно, Φ_{Ti} , Φ_V и Φ_{FeM} , Φ_d . С учетом функций влияния выразим цену и себестоимость обогащения следующими равенствами:

$$Ц(Ti, V) = Ц_0(1 + \Phi_{Ti})(1 + \Phi_V); \quad (3)$$

$$C_{об}(FeM, d) = C_{об.0}(1 + \Phi_{FeM} + \Phi_d), \quad (4)$$

где $C_{об.0}$ и $Ц_0$ – себестоимость обогащения и цена выходной продукции, полученные по результатам переработки руды с параметрами нормальной кондиции. Функции Φ обращаются в нуль при соответствующих равенствах: $C_{Ti} = C_{Ti0}$, $C_V = C_{V0}$, $C_{FeM} = C_{FeM0}$, $d = d_0$. В расчете цены влияние содержаний C_{Ti} и C_V взаимно дополняющее, а в расчете себестоимости влияние C_{FeM} и d взаимно компенсирующее. Поэтому в выражении (3) факторы влияния умножаются, а в формуле (4) – суммируются.

Выразим отношения себестоимостей обогащения и добычи руды с нормальной кондицией, а также суммарной себестоимости и цены выходной продукции, полученные по результатам ее переработки, с помощью отраслевых коэффициентов K и ε :

$$\frac{C_{об.0} + C_{доб.0}}{C_0} = K ; \quad \frac{C_{об.0}}{C_{доб.0}} = \varepsilon . \quad (5)$$

Преобразуем выражение КЭПр (1) с учетом соотношений (2) – (5) к следующему функциональному виду:

$$КЭПр = \frac{(1 + \Phi_{Ti})(1 + \Phi_V) - K(1 + \varepsilon)^{-1}[\varepsilon(1 + \Phi_{FeM} + \Phi_d) + 1]}{1 - K} . \quad (6)$$

Приведем формулу (6) к конкретному расчетному состоянию на примере оценки качества титаномагнетитов Гусевгорского месторождения. Учитывая технико-экономические показатели горного производства [2], положим следующие значения коэффициентов: $K=0,65$ и $\varepsilon=3$. Возможные интервалы влияния рудных параметров на экономические показатели, согласно технологическим наблюдениям [3 – 4] и предварительным экспертным оценкам, приведены в табл. 1.

Функции влияния Φ_{Ti} , Φ_V , Φ_{FeM} , Φ_d выразим нелинейной регрессией квазиступенчатого вида. Параметры и коэффициенты соответствующих уравнений регрессии рассчитаем по данным табл. 1 с помощью известной компьютерной программы «Тренды ФСП-1». Полученные функции и их графики представлены на рис. 1.

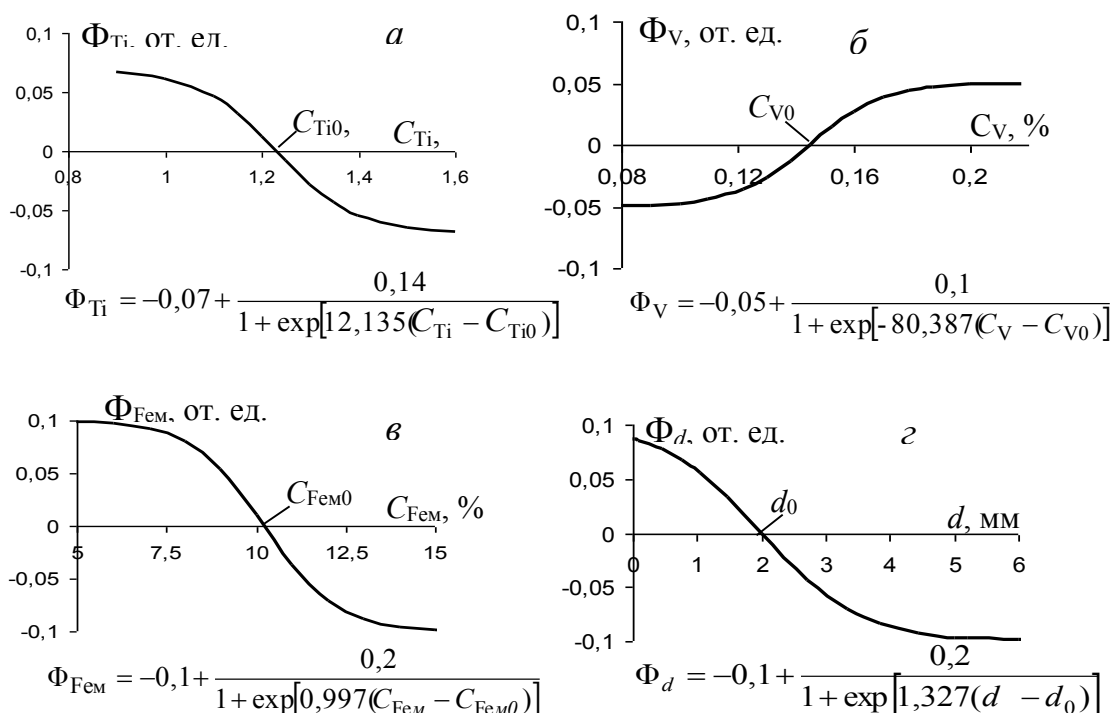


Рис. 1 – Математические выражения и графики функций влияния:

$a - \Phi_{Ti}$; $б - \Phi_V$; $в - \Phi_{FeM}$; $г - \Phi_d$

После подстановки в равенство (6) значений коэффициентов и математических выражений функций влияния получим следующую формулу, по которой рассчитывается показатель качества руды КЭПр:

$$КЭПр = 1,53 \left[\left(0,93 + \frac{0,14}{1 + \exp[12,135(C_{Ti} - C_{Ti0})]} \right) \left(0,95 + \frac{0,1}{1 + \exp[-80,387(C_V - C_{V0})]} \right) - \right. \\ \left. - 0,65 \left(0,8 + \frac{0,2}{1 + \exp[0,997(C_{FeM} - C_{FeM0})]} + \frac{0,2}{1 + \exp[1,327(d - d_0)]} \right) \right] . \quad (7)$$

Аргументами функции КЭПр является набор рудных параметров C_{Ti} , C_V , C_{FeM} , d . Функция обладает свойствами гладкости, непрерывности и однозначности. Еще отметим ее важное свойство эквивалентности, выражающее комплексное, то есть совместное влияние на качество руды всех обозначенных параметров. Это свойство проявляется в сохранении значений КЭПр при разнонаправленном действии аргументов, например, снижении C_{FeM} и увеличении d или снижениях C_{Ti} и C_V . Примеры оценок показателя КЭПр, рассчитанные по параметрам руды, находящейся в некоторых точках горизонта титаномагнетитов с координатами (X , Y), сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения параметров руды и показателя ее качества КЭПр
в отдельных точках горизонта титаномагнетитов**

Номер точки	X , м	Y , м	C_{Ti} , %	C_V , %	C_{FeM} , %	d , мм	КЭПр, %
Руда повышенного качества							
1	1452	1115	1,10 ↑	0,138	10,5	3 ↑	119,2
2	1200	1439	1,21	0,158	11,6 ↑	2	117,7
3	1262	1333	1,50 ↓	0,181 ↑	12,4 ↑	3 ↑	112,6
Руда среднего качества							
4	1701	1029	1,16	0,116	9,9 ↓	3 ↑	101,9
5	1524	1146	1,30 ↓	0,145	10,2	3 ↑	100,0
6	1595	1041	1,12 ↑	0,124 ↓	9,9	2	99,3
Руда сниженного качества							
7	1478	1188	1,52 ↓	0,152	9,8 ↓	2	82,0
8	1249	1160	1,04 ↑	0,099 ↓	7,3 ↓	0,6 ↓	79,4
9	1300	1118	1,40 ↓	0,154	9,6 ↓	0,6 ↓	74,9

Руда среднего качества принимает значения КЭПр, близкие к 100 %. Руда повышенного или сниженного качества характеризуется, соответственно, увеличенными или уменьшенными значениями КЭПр. Рядом со значениями рудных параметров, повышающими КЭПр, проставлены стрелки, направленные вверх. Значения параметров, снижающие КЭПр, сопровождаются стрелками, направленными вниз. Так большинство стрелок в параметрах руды повышенного качества направлены вверх, а сниженного качества – вниз. В руде, относящейся к точке № 5, размер d зерен магнетита 3 мм и содержание C_{Ti} двуокиси титана 1,3 % выше их средних значений. Соответственно, в расчете показателя КЭПр себестоимость обогащения руды и цена выходной продукции снижены так, что его значение осталось на среднем уровне 100 %.

Модели распределения КЭПр в геопространстве. Геоинформационное назначение показателя качества руды КЭПр реализуется построением модели его пространственного распределения в массиве титаномагнетитов. Исходными данными для моделирования являются локальные значения показателя КЭПр в координированных узловых точках геопространства, рассчитанные по формуле (7). При этом используют значения в данных точках рудных параметров C_{Ti} , C_V , C_{FeM} , d , полученные в результате геофизических магнитных измерений и геологического опробования руды. По созданной та-

ким образом метрической матрице узловых точек строится математическая или цифровая модель распределения КЭПр в геопространстве. Модели представляют в виде карты, плана или разреза.

Приведем пример построения горизонтального плана распределения КЭПр в массиве титаномагнетитов Гусевогорского месторождения. Значения показателя КЭПр в отдельных координированных узловых точках площади титаномагнетитов показаны на рис. 2а. План построим кригинг-интерполяцией. Соответствующие цифровые расчеты проведем в узлах прямоугольной сетки с относительным размером 30×30 . Предварительно установлено, что пространственная корреляция показателя КЭПр в узловых точках изотропна. Его полувариограмма достаточно близко аппроксимируется функцией Гаусса с радиусом корреляции, равным 6 единиц сетки. План, полученный в результате расчетов, представлен на рис. 2б.

На плане отображаются особенности горизонтального распределения качества титаномагнетитов. Участки с разными его значениями ограничены изолиниями. Качество руды на участках со значениями КЭПр от 95 % до 105 % обеспечивает получение прибыли от реализации выходной продукции горно-обогажительного производства, соответствующей установленной норме. Качество руды на других участках плана, где значения показателя КЭПр больше 105 % или меньше 95 % приводит к получению, соответственно, большей или меньшей прибыли. Участки руды с повышенным показателем КЭПр расположены преимущественно на северо-западе и юго-востоке плана. Руда со сниженным КЭПр расположена на северо-восточных и юго-западных участках.

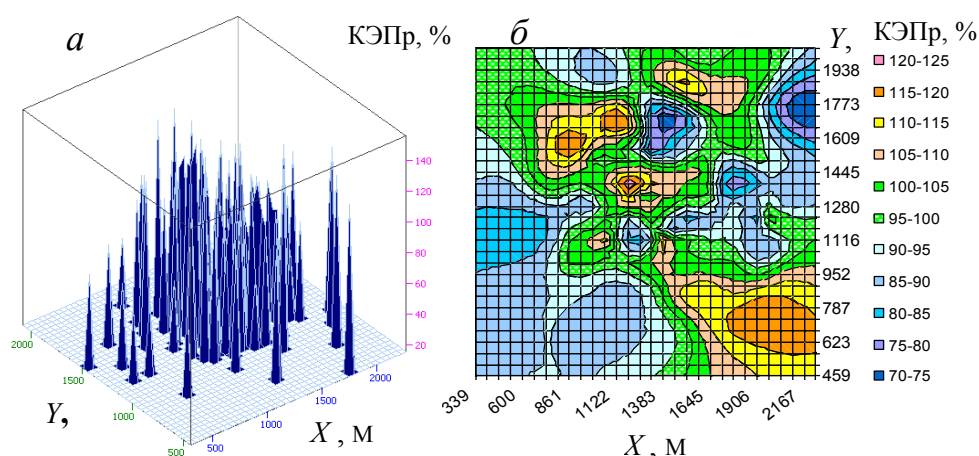


Рис. 2 – Распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов, полученные в результате измерений рудных параметров в узловых точках (а) и последующего моделирования плана (б)

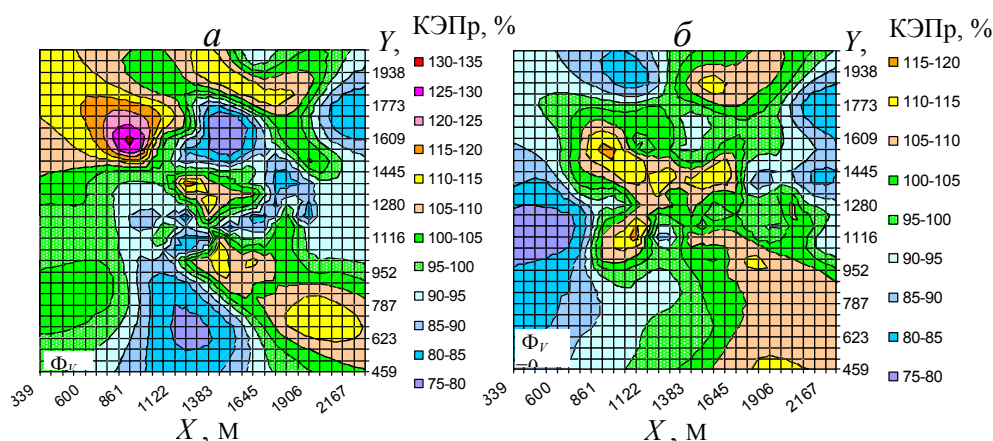


Рис. 3 – Планы распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов без учета влияний: ванадия (а); ванадия и титана (б)

В связи с изменчивостью торгового рынка, возможно, в некоторый период горно-обогатительного производства учитывать влияние титана и ванадия на ценообразование выходной продукции нецелесообразно из-за сложившейся экономической конъюнктуры. Тогда в формулах (6) и (7) при расчете КЭПр в узловых точках следует положить соответствующие функции влияния равными нулю: $\Phi_{Ti}=0$, $\Phi_V=0$. Планы показателя качества руды КЭПр на горизонте титаномагнетитов, полученные при данных условиях, показаны на рис. 3.

Сравнивая планы, представленные на рис. 2 и рис. 3, отметим, что на западном участке плана, построенного без учета ванадия, показатель КЭПр существенно повышается. На этом же участке плана, построенного без совместного учета ванадия и титана, показатель КЭПр снижается. Это объясняется тем, что содержание ванадия и титана в магнетитах этого участка ниже нормальной кондиции.

Заключение. Методом геоинформационного отображения качества ванадийсодержащей малотитанистой магнетитовой руды, как показано на примере Гусевогорского месторождения, выделяются в геопространстве ее участки по новому признаку – предложенному показателю КЭПр, выражающему интегрированное воздействие параметров руды на относительную прибыль, получаемую в итоге ее добычи, обогащения и реализации полученной продукции.

Модель КЭПр обобщенного вида (6) допускает подстановку в нее разных значений коэффициентов K , ε и функций влияния Φ_{Ti} , Φ_V , Φ_{FeM} , Φ_d в зависимости от особенностей технологических режимов добычи и дробильно-обогатительного передела руды, а также стратегии ценообразования выходной продукции. В связи с этим интервалы изменения параметров руды и функций влияния, представленные в табл. 1, могут быть скорректированы. Последующие вычислительные операции легко выполняются современными компьютерными технологиями. Таким образом, расчетная модель (7) является лишь частным случаем выражения КЭПр. Тем не менее представленные на рис. 2 и рис. 3 планы распределения показателя КЭПр на горизонте титаномагнетитов показывают принципиальную возможность использования их для повышения эффективности планирования горных работ и управления ими.

Литература

1. Яковлев В.Л. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения / В.Л. Яковлев, Ю.В. Лаптев, А.М. Яковлев // Литосфера. – 2014. – № 5. – С. 122 – 128.
2. Сборник технико-экономических показателей горных предприятий Урала за 1990 - 2000 гг. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. – С. 23.
3. Порцевский А.К. Управление качеством рудной массы на открытых горных работах / А.К. Порцевский. – М.: МГГА, 1998. – 44 с.
4. Исследование титаномагнетитовых руд и концентратов ОАО «ЕВРАЗ КГОК» / А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, С.В. Корнилков и др. // Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые»: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений: доклады научн.-практ. конф. 1 – 2 октября 2013 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2013. – С. 28 – 34.