

О ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ В ЖЕЛЕЗНЫХ РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАШТАГОЛ

П. И. РАЙСКИЙ

(Представлено научным семинаром кафедр маркшейдерского дела и геодезии)

Изучение химико-технологического состава железных руд имеет важное практическое значение для металлургии. Между тем в геологической литературе по месторождениям Горной Шории данный вопрос освещен с недостаточной для практических целей полнотой.

Как правило, в литературе указываются только пределы изменения содержания различных компонентов в руде. Например, для руд месторождения Таштагол указывается, что содержание в них SiO_2 изменяется от 6 до 18%. То же самое сказано относительно CaO , Al_2O_3 и других компонентов.

В литературе ни слова не говорится о том, как изменяется содержание SiO_2 , CaO и других компонентов в рудах с различным содержанием в них железа, поэтому металлурги упрекают геологов в том, что они дают неполную характеристику вещественного состава железных руд.

Для изучения вещественного состава железных руд в период разведки и эксплуатации месторождения производятся десятки, а иногда и сотни анализов на различные компоненты, входящие в их состав. Однако эти богатые данные без соответствующего их анализа также не раскрывают до конца картину о количественных изменениях различных компонентов в рудах с различным содержанием в них железа.

Если же изучить закономерные взаимосвязи между различными компонентами в железных рудах, то эти взаимосвязи раскроют картину о том, как изменяется содержание различных компонентов в зависимости от изменения в них содержания железа.

Изученность взаимосвязей между различными компонентами в железных рудах позволит сократить количество анализов на их определение, облегчит процесс усреднения руд в период их добычи, что очень важно для получения рудного сырья с постоянным химико-минералогическим составом.

Использование усредненного рудного сырья в металлургии, в свою очередь, улучшит работу доменной печи, повысит коэффициент извлечения металла из руды.

Связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с Fe и Fe_2O_3

В работе [1] нами указывалось, что в железных рудах месторождений Горной Шории содержание большинства компонентов, входя-

ших в их состав, находится в обратной зависимости от содержания в них железа рудного Fe, т. е. при увеличении содержания железа в руде содержание компонентов уменьшается.

Дальнейшие исследования взаимосвязей между компонентами показали, что количество SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в руде зависит также от содержания в ней FeO и Fe_2O_3 .

В различных сортах железной руды при одном и том же содержании железа рудного количество FeO и Fe_2O_3 бывает различное. Если содержание FeO в руде уменьшается, то содержание Fe_2O_3 увеличивается и, наоборот, при увеличении содержания FeO содержание Fe_2O_3 в руде уменьшается.

Как в первом, так и во втором случаях количество SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO также уменьшается или увеличивается. Таким образом, содержание вышеупомянутых окислов в руде является функцией от содержания в ней FeO и Fe_2O_3 .

Для изучения вопроса о том, как влияет изменение количества FeO и Fe_2O_3 в руде на содержание других в ней компонентов, нами были построены графики зависимости содержания окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в руде от содержания в ней FeO и Fe_2O_3 . Два таких графика изображены на рис. 1 и 2.

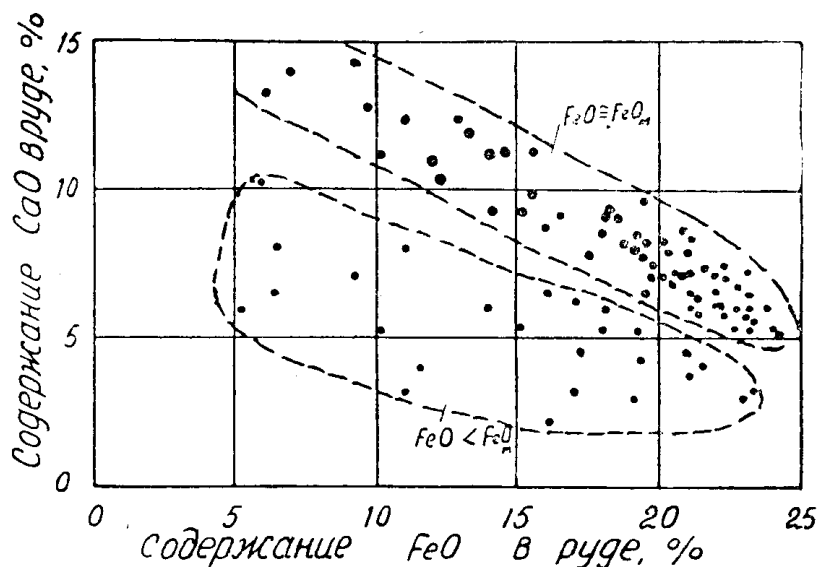


Рис. 1. График зависимости содержания CaO в руде от содержания в ней FeO .

Исследования показали, что содержание окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в железных рудах находится в обратной почти прямолинейной зависимости от содержания в них FeO и Fe_2O_3 . При этом было установлено, что все вышеупомянутые окислы как с FeO , так и с Fe_2O_3 имеют две ясно выраженные области корреляционной зависимости, которые смещены относительно друг друга (рис. 1, 2).

Верхняя корреляционная связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с FeO и Fe_2O_3 характерна для железных руд, в которых содержание FeO и Fe_2O_3 равно или близко содержанию FeO и Fe_2O_3 для чистых магнетитовых руд.

Для чистых магнетитов содержание FeO и Fe_2O_3 может быть вычислено по формулам

$$\text{FeO}_M = 0.43\text{Fe рудное}, \quad (1)$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_{3M} \cong \text{Fe рудное}. \quad (2)$$

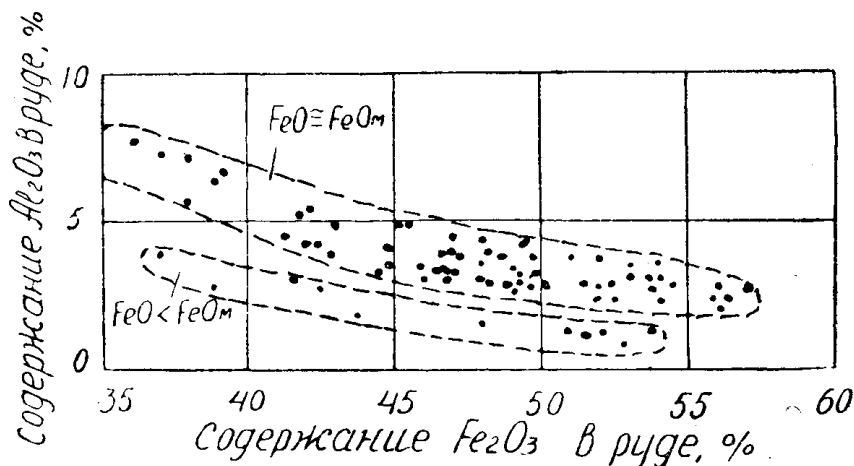


Рис. 2. График зависимости содержания Al_2O_3 в руде от содержания в ней Fe_2O_3 .

Отношение (1) известно из учебников аналитической химии. Параметры равенства (2) определены нами методом теории корреляции по 430 анализам. Вычисления здесь не приводятся.

Нижняя область корреляционной связи окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с FeO и Fe_2O_3 относится к тем рудам, в которых содержание FeO и Fe_2O_3 резко отличается от вычисленных содержаний FeO и Fe_2O_3 по формулам (1) и (2).

Для практических целей важно знать не только форму, но и степень надежности взаимосвязи между компонентами. Оценка степени надежности прямолинейной корреляционной связи производится с помощью коэффициента корреляции. Если коэффициент корреляции близок к единице или равен единице, то между компонентами имеется прямолинейная связь.

Исследования показали, что степень надежности связи окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с Fe_2O_3 является достаточно высокой, так как коэффициенты корреляции по своей величине близки к единице (табл. 1). Особенно хорошая связь CaO с Fe_2O_3 (коэффициент корреляции равен 0,97).

С FeO окислы кремния, алюминия и других имеют более слабую связь, чем с Fe_2O_3 . Особенно связь окислов металлов с FeO будет плохой в том случае, если связь между ними рассматривать как одну статистическую совокупность, т. е. не разбивать ее на две области. В этом случае в отдельных пробах максимальное отклонение содержания CaO в руде отличается от вычисленного значения CaO по сглаженной кривой более чем на 5%.

Таким образом, исследованиями установлено (рис. 1, 2), что количества FeO и Fe_2O_3 в железных рудах существенно влияют на образование числа областей взаимосвязи между окислами SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO . Для каждой области компоненты SiO_2 и другие взаимосвязаны в различных количественных отношениях, что подтверждается нижеприведенными данными исследований.

Таблица 1

Оценка надежности взаимосвязи SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с Fe , Fe_2O_3
и $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

Наименование отношения	Сорт руды	К-во анализов	Коэффициент корреляции	Погрешность коэффициента корреляции
$\text{SiO}_2 - \text{Fe}$	магнетитовая	88	-0,920	$\pm 0,013$
$\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	"	70	-0,925	$\pm 0,012$
$\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	"	70	-0,934	$\pm 0,011$
$\text{CaO} - \text{Fe}$	"	78	-0,842	$\pm 0,012$
$\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	"	78	-0,970	$\pm 0,011$
$\text{CaO} - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	"	71	-0,89	$\pm 0,017$
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}$	"	87	-0,802	$\pm 0,040$
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	"	80	-0,901	$\pm 0,020$
$\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	"	71	-0,930	$\pm 0,018$
$\text{MgO} - \text{Fe}$	"	69	-0,803	$\pm 0,030$
$\text{MgO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	"	70	-0,861	$\pm 0,025$
$\text{MgO} - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	"	67	-0,834	$\pm 0,021$

Взаимосвязь между окислами SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO .

Характеристика о вещественном составе железных руд будет более полной, если изучить вопрос, в каких количественных отношениях связаны входящие в их состав компоненты SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO .

Для решения данного вопроса нами были построены различные графики, а именно:

а) графики зависимости содержания в руде CaO , Al_2O_3 и MgO от содержания в ней SiO_2 ;

б) графики зависимости содержания в руде Al_2O_3 и MgO от содержания в ней CaO ;

в) график зависимости содержания в руде MgO от содержания в ней Al_2O_3 .

Один из этих графиков для примера приведен на рис.3. (см. стр. 114).

Построение графиков показало, что между окислами SiO_2 , CaO и другими имеется почти прямолинейная зависимость. При этом необходимо заметить, что в железных рудах нами установлены две области корреляционной связи SiO_2 с CaO , Al_2O_3 и MgO ; CaO с Al_2O_3 и MgO и Al_2O_3 с MgO , которые параллельно смещены относительно друг друга (рис. 3).

Верхняя корреляционная связь между окислами Si , Ca , Al и Mg относится к тем железным рудам, в которых содержание FeO и Fe_2O_3 равно или близко содержанию FeO и Fe_2O_3 для чистых магнетитов (рис. 3).

Нижняя область корреляционной связи между вышеперечисленными компонентами характерна для руд, в которых содержание FeO и Fe_2O_3 или больше, или меньше, чем в чистых магнетитовых рудах. Каждая из этих корреляционных связей относится к различным сортам руды.

Так как в каждом сорте руды компоненты SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO взаимосвязаны в различных количественных отношениях, то связь

между ними необходимо устанавливать отдельно для каждого сорта руд.

Степень связи между окислами SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO достаточно высокая, так как коэффициенты корреляции по величине близки

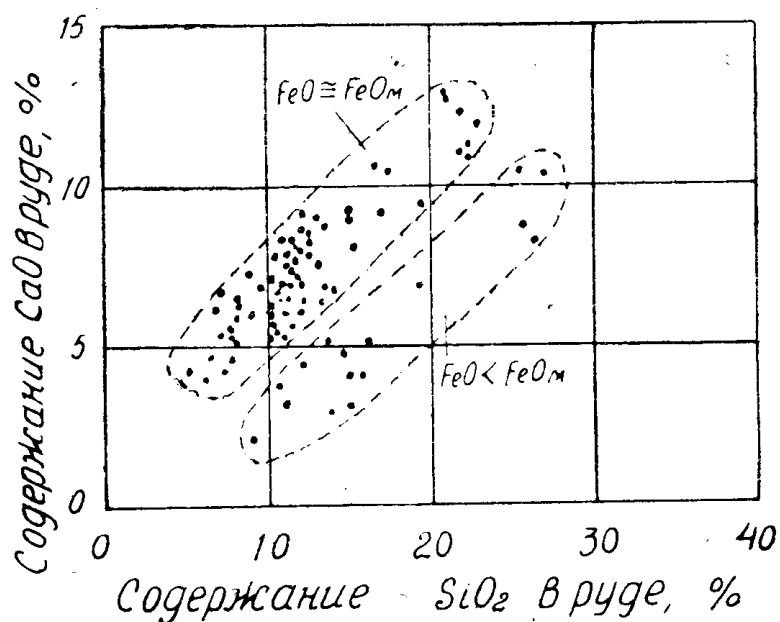


Рис. 3. График зависимости содержания CaO в руде от содержания в ней SiO_2 .

к единице (табл. 2). Особенно хорошая взаимосвязь SiO_2 с MgO и CaO ; Al_2O_3 с MgO .

Таблица 2

Оценка надежности взаимосвязи между компонентами SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO

Название отношения	Сорт руды	Кол-во анализов	Коэффициент корреляции	Погрешность коэффициента корреляции
$\text{SiO}_2 - \text{CaO}$	Магнетитовая	66	0,918	$\pm 0,02$
$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	"	83	0,904	$\pm 0,02$
$\text{SiO}_2 - \text{MgO}$	"	58	0,965	$\pm 0,014$
$\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$	"	77	0,853	$\pm 0,03$
$\text{CaO} - \text{MgO}$	"	83	0,830	$\pm 0,03$
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$	"	93	0,943	$\pm 0,012$

Исследованиями установлено, что наиболее выгодной функцией для выражения этих связей в аналитической форме является показательная функция вида

$$y = Ae^{Bx} + C, \quad (3)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Для различных связей нами были определены методом средних параметры C , A и B формулы (3). Результаты определения представлены в табл. 3.

Контроль параметров формул табл. 3 произведен путем сравнения содержаний Al_2O_3 и MgO в руде, вычисленных по формулам (3Б) — (3Е).

Таблица 3

Эмпирические формулы, выражающие взаимосвязь между SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в аналитическом виде

Сорт руды	Вид формулы
Магнетитовая	$\text{CaO}, \% = 26 - 26e^{-2.76\text{SiO}_2}$ (3А)
"	$\text{Al}_2\text{O}_3, \% = 26 - 26e^{-1.22\text{SiO}_2}$ (3Б)
"	$\text{MgO}, \% = 26 - 26e^{-0.322\text{SiO}_2}$ (3В)
"	$\text{Al}_2\text{O}_3, \% = 3,2e^{9\text{CaO}} - 3,2$ (3С)
"	$\text{MgO}, \% = 3,2e^{3.68\text{CaO}} - 3,2$ (3Д)
"	$\text{MgO}, \% = 7.45 - 7.45e^{-4.34\text{Al}_2\text{O}_3}$ (3Е)

Примечание: 1) 26, 3.2; 7.45 — коэффициенты, численно равные среднему содержанию в земной коре Si, Ca и Al, % (по диаграмме работы (2)).

2) Значение SiO_2 , CaO и Al_2O_3 в формулах (3А) — (3Е) табл. 3 в относительных единицах.

Разница в вычисленных по разным формулам содержаниях Al_2O_3 и MgO в руде получалась незначительной (табл. 4).

Связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

Сравнивая результаты анализов железной руды на различные компоненты, было замечено, что в тех пробах, в которых содержание FeO в руде меньше вычисленного содержания FeO по формуле (1), содержание Fe_2O_3 в этих пробах больше содержания Fe рудн. И, наоборот, в тех пробах, в которых содержание FeO в руде больше вычисленного FeO по формуле (1), содержание Fe_2O_3 в таких пробах меньше содержания Fe рудн.

Как в первом, так и во втором случаях содержание в руде SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO сильно изменяется, поэтому нами проведены исследования на корреляционную связь этих компонентов с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$.

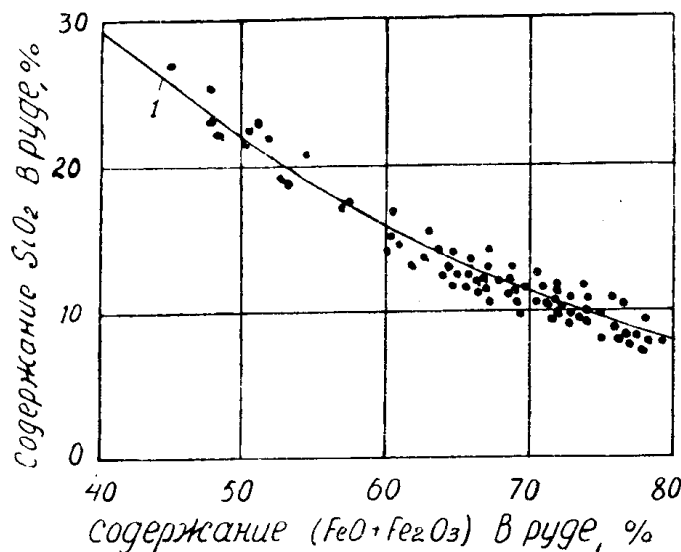


Рис. 4. График зависимости содержания SiO_2 в руде от содержания в ней $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$.

Были построены графики зависимости окислов Si, Ca, Al и Mg от $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ и сделана оценка надежности связи между ними (табл. 1). Один из таких графиков изображен на рис. 4.

Таблица 4

Сравнительная таблица содержаний CaO , Al_2O_3 и MgO руде, вычисленных по формулам (3А) — (3Е)

Исходные данные		Содержание компонентов в руде, %								Полная основ- ность руды $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$
		CaO		Al ₂ O ₃		MgO				
		Вычисленное по формулам								
Fe рудн., %	SiO ₂ , %	(3А)	По Fe Работа [1]	(3Б)	(3С)	по Fe Работа [1]	(3В)	(3Д)	(3Е)	
30	22,0	11,8	12,1	6,2	6,0	6,5	1,8	1,72	1,78	
40	16,4	9,4	9,5	4,7	4,2	4,8	1,4	1,34	1,40	
50	11,4	6,4	6,8	3,3	2,8	3,1	1,0	0,93	1,05	
									0,49	
									0,52	
									0,51	

Исследования показали, что связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ является обратной, почти прямолинейной и достаточно надежной.

Степень надежности связи окислов Si , Ca , Al и Mg с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ является более высокой, чем с Fe руд. Об этом можно судить по величине коэффициентов корреляции табл. 1. Лучшая связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, чем с Fe рудн., хорошо подтверждается графиком рис. 4 и другими, которые здесь не приводятся. Содержание окислов Si , Ca , Al и Mg в единичных пробах по данным анализов, относительно вычисленных содержаний по формулам (4)–(7), не превышает следующих пределов: для SiO_2 —2%, CaO —1,5%, Al_2O_3 —1% и MgO —0,2%. Для связей SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с Fe руд. эти пределы отклонения в два раза больше.

В аналитическом виде для магнетитовых руд связь SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ может быть выражена следующими эмпирическими формулами

$$\text{SiO}_2, \% = 85e^{-1.166(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)} - 26; \quad (4)$$

$$\text{CaO}, \% = 29.2 - 15.2e^{0.7(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)}; \quad (5)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3, \% = 27e^{-1.35(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)} - 7.45; \quad (6)$$

$$\text{MgO}, \% = 6.52e^{-0.96(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)} - 2.35, \quad (7)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

В формулах (4)–(7) $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ необходимо брать в относительных единицах.

Выводы

На основании полученных результатов исследований связи содержания окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в железных рудах с содержанием в них FeO и Fe_2O_3 можно сделать следующие выводы.

1. В железных рудах месторождения Таштагол содержания SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO находится в обратной почти прямолинейной зависимости от содержания в них FeO и Fe_2O_3 . Между содержанием самих окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO также имеется близкая к прямолинейной, достаточно надежная корреляционная связь.

2. Количество SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO в железных рудах сильно зависит от степени их окисленности, т. е. от содержания в них Fe_2O_3 и FeO . Для каждого сорта руд окислы SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO взаимосвязаны в различных количественных отношениях, поэтому зависимость между ними необходимо устанавливать отдельно для каждого сорта руд.

3. Между содержанием SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO в руде и содержанием в ней $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ также имеется обратная, достаточно надежная, почти прямая зависимость. Особенно хорошая связь SiO_2 и Al_2O_3 с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (коэффициенты корреляции близки к единице).

4. Сравнивая значения коэффициентов корреляции табл. 1 для связей окислов SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и MgO с Fe , Fe_2O_3 и $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$, можно заметить, что наилучшая связь — SiO_2 и Al_2O_3 с $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, а CaO и MgO с Fe_2O_3 . Поэтому для практических целей содержание в руде SiO_2 , Al_2O_3 лучше всего находить из зависимости SiO_2 и Al_2O_3 от $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, а CaO и MgO — из связи CaO и MgO с Fe_2O_3 . Если пользоваться указанными зависимостями, то можно определить

их содержание в руде с погрешностью SiO_2 —2%, Al_2O_3 —1%, CaO —1% и MgO —0,2%.

5. Результаты наших исследований о корреляционной связи между компонентами в железных рудах месторождения Таштагол еще раз подтверждают справедливость слов академика А. Е. Ферсмана: „В недрах земли не хаотическое скопление элементов и их соединений, а царствует чрезвычайный порядок, обусловливаемый закономерными свойствами и взаимосвязями между геохимическими элементами“ [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Райский П. И. О корреляционной связи между компонентами в магнетитовых рудах месторождений Горной Шории. Известия вузов, Горный журнал, № 9, 1959.
 2. Справочник маркшейдера. Металлургиздат, 1958.
 3. Ферсман А. Е. Геохимия, т. 1, 1934.
-