

Изучение парамагнитных свойств горных пород (пирит, арсенопирит, халькопирит и магнетит) при высоких температурах.

¹Кувандиков О.К., ¹Шакаров Х.О., ¹Шодиев З.М., ²Музаффаров А.,
¹Амонов Б.У., ¹Нуримов У.Э., ¹Каримов О.И.

1. Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан
2. Центральной научно-исследовательской лаборатории Навоинского горно – металлургического комбината, Узбекистан.

Физика магнетизма способна предсказать магнитные свойства материалов по их структуре; это относится и к горным породам. Однако такой подход не оптимален: он требует глубокого изучения структурных характеристик вещества, что недоступно в геофизических исследованиях. С другой стороны, измерения магнитных свойств горных пород не представляют затруднений даже при большом числе образцов. Природа магнетизма горных пород и характеристику факторов, определяющих закономерности распределения магнитных свойств различных горных пород, необходимо дополнить эмпирическими данными для наиболее распространенных минералов горных пород и руд, которые вызывают магнитные аномалии [1].

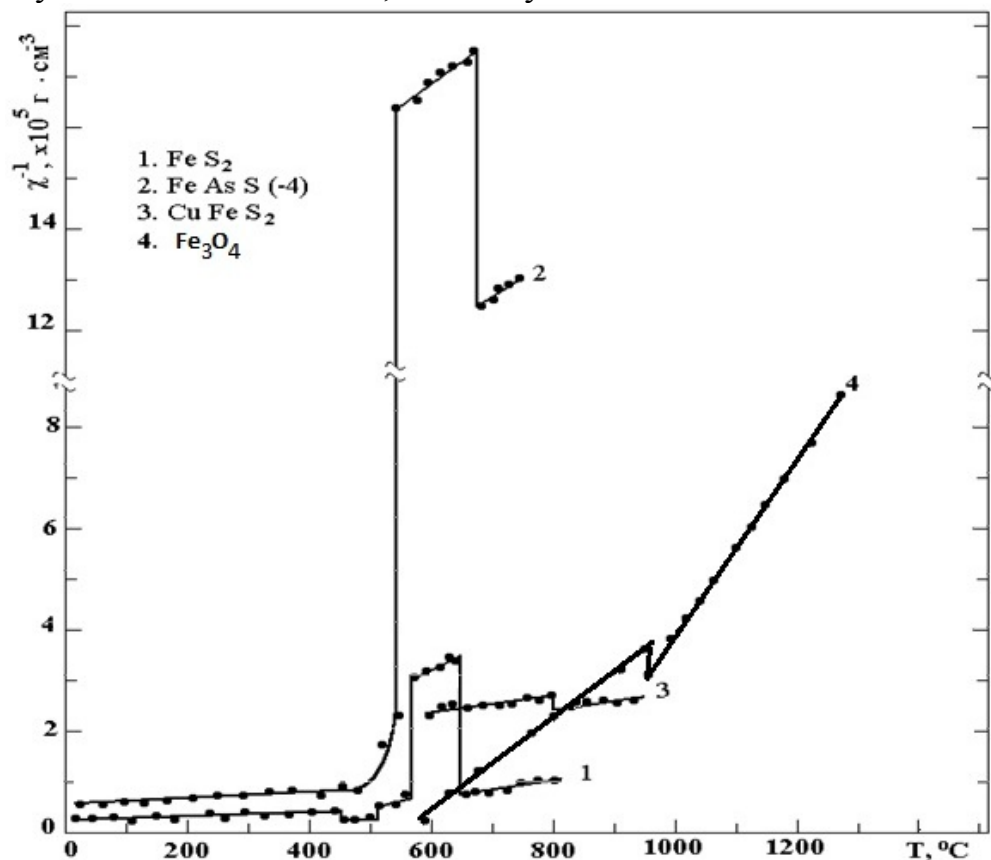
Магнитные состояния горных пород и руд представляют отдельный интерес для физики магнитных явлений, так как, в связи со сложной кристаллической структурой, магнитные структуры этих минералов необходимы для понимания их ключевых особенностей. Имеется мало экспериментальных данных о магнитных свойствах и электронной структуре минералов горных пород при высоких температурах. Парамагнитное состояние этих соединений к сегодняшнему дню почти не изучено.

Целью настоящей работы является определение основных магнитных характеристик железо содержащих минералов пирита (FeS_2), арсенопирита (FeAsS), халькопирита (CuFeS_2) и магнетита (Fe_3O_4), входящих в состав горных пород Узбекистана, методом измерения температурной зависимости их магнитной восприимчивости [$\chi(T)$] в интервале высоких температур 20-1200⁰С.

Магнитная восприимчивость измерялась методом Фарадея с помощью высокотемпературных маятниковых весов [2]. Максимальная относительная ошибка измерения χ не превышала 3%. Образцы горных пород (минералов) получены из Центральной научно-исследовательской лаборатории Навоинского горно – металлургического комбината.

Зависимости $\chi(T)$ для пирита и арсенопирита измеряли в интервале температур 20-800⁰С, халькопирита в 500-900⁰С, а магнетита 580-1200⁰С. Результаты измерений в виде зависимости $\chi^{-1}(T)$ приведены на рисунке. Из рис. видно, что это зависимость для пирита (график 1) имеет сложный характер: χ^{-1} в интервале температур 20-450⁰С слабо увеличивается линейно; уменьшается и увеличивается, соответственно при 450⁰С и 500⁰С

слабым скачком; увеличивается в интервале температур 510-570⁰С-линейно, при 570⁰С – скачком, а в интервале температур 570-670⁰С – линейно; при 670⁰С уменьшается скачком, а затем увеличивается линейно. Линейный



Температурные зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных соединений пирита, арсенопирита и халькопирита. (Значения χ для образца 2 находится вычитанием $4 \cdot 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$).

характер зависимости $\chi^{-1}(T)$ пирита в интервалах температур 510-560⁰С, 570-660⁰С и 670-770⁰С свидетельствует о том, что эти зависимости подчиняются закону Кюри-Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_p}, \quad (1)$$

где C – постоянная Кюри-Вейсса; θ_p – парамагнитная температура Кюри.

Анализ зависимости $\chi^{-1}(T)$ арсенопирита (график 2) показывает следующее: χ^{-1} увеличивается линейно с ростом температур в интервалах температур 20-480⁰С, 490-550⁰С, 560-680⁰С и 680-750⁰С; при 480⁰С и 550⁰С – скачком, а при 680⁰С уменьшается тоже скачком. Линейный характер $\chi^{-1}(T)$ зависимости арсенопирита в вышеуказанных интервалах температур свидетельствует о том, что эти зависимости подчиняются закону Кюри-Вейсса в виде (1).

Зависимость $\chi(T)$ для халькопирита измеряли в интервале температур 500-900⁰С, а магнетита - 600-1200⁰С. Анализ зависимости $\chi^{-1}(T)$ халькопирита и магнетита (график 3, 4) показал, что они по сравнению с

зависимостями $\chi^{-1}(T)$ пирита и арсенопирита имеют более простой характер: χ^{-1} халькопирита растет линейно в интервалах температур 600-800⁰С, 800-900⁰С, при 800⁰С уменьшается скачком. χ^{-1} магнетита в интервалах температур 580-960⁰С, 960-1200⁰С растет линейно при 960⁰С уменьшается скачком. Это свидетельствует о том, что зависимости $\chi^{-1}(T)$ халькопирита и магнетита, в указанных интервалах температур тоже подчиняются закону Кюри-Вейсса в виде (1).

Аномальные изменения на экспериментальных зависимостях $\chi^{-1}(T)$ исследуемых образцов можно объяснить магнитными и структурными (полиморфными) переходами, приходящиеся в подрешетке железа этих образцов [3-5]. Эти переходы своеобразно отражаются и на зависимостях $\chi^{-1}(T)$ изученных железосодержащих соединений в зависимости от температуры и состава слабомагнитных элементов (As, S, Cu, O). Следовательно, аномальные изменения на зависимостях $\chi^{-1}(T)$ изученных образцов происходят из-за магнитных и структурных фазовых переходов, происходящих в них при определенных температурах: В пирите при 500⁰С происходит магнитный фазовый переход ферромагнит-парамагнит, а при температурах 570⁰С и 670⁰С, соответственно, структурные переходы $ОЦК \rightarrow ГЦК$ и $ГЦК \rightarrow ОЦК$. В арсенопирите при 480⁰С происходит магнитный фазовый переход ферромагнит-парамагнит, а при 550⁰С и 650⁰С, соответственно, полиморфные переходы $ОЦК \rightarrow ГЦК$ и $ГЦК \rightarrow ОЦК$; В халькопирите при 800⁰С, а в магнетите при 960⁰С происходит структурный переход $ГЦК \rightarrow ОЦК$.

Образцы	Интервал температуры t, ⁰ С	C, 10 ³ см ³ Г ⁻¹ К	θ_p, K	μ_ϕ, μ_B	$\mu_{эфф}, \mu_B$
Fe	768-910	28,1.	1053	-	3.54
	910-1392	135,96	-2027	-	7.8
	1392-1536	25,0	1100	-	3.34
FeS ₂	510-560	2.0	723	1.39	1.78
	570-660	1.41	393	1.16	1.48
	670-850	4.89	413	2.16	2.68
FeAsS	480-550	0.315	733	0.64	0.83
	560-670	0.684	-347	0.94	1.22
	680-850	0.625	223	0.90	1.17
CuFeS ₂	610-800	7.496	-627	3.32	5.13
	810-900	3.420	148	2.24	3.47
FeFe ₂ O ₄	580-960	105.2	873	4.42	4.72
	970-1200	49.4	1083	3.03	2.96

Применением метода наименьших квадратов на экспериментальные зависимости изученных образцов рассчитывали их парамагнитные характеристики C, θ_p , магнитный момент приходящийся на химическую формулу ($\mu_{фop}$) и эффективный магнитный момент приходящийся на один

атом железа ($\mu_{эфф}$). Результаты расчетов приведены в таблице. Данные для чистого железа получены из [5]. Анализ табл. показывает, что значения магнитные характеристики (θ_p и $\mu_{эфф}$) изученных соединений меньше, по сравнению с значениями магнитными характеристиками чистого железа. Это можно объяснить увеличением расстояния между магнитными ионами железа, находящихся в узлах подрешетки изученных соединений. Это происходит присутствием слабомагнитных элементов в кристаллических решетках их соединений. Благодаря именно этой причине уменьшается магнитное обменное взаимодействие электронов 3d- оболочки ионов железа, ответственные за возникновение магнитного упорядочения изученных соединений. θ_p является энергетической мерой этого взаимодействия.

На основании полученных результатов в работе можно сделать следующие выводы:

1. Впервые при высоких температурах измерены зависимости $\chi^{-1}(T)$ железосодержащих соединений (минералов) FeS_2 , FeAsS , CuFeS_2 , Fe_3O_4 . Установлено, что эти подчиняются закону Кюри-Вейсса.
2. По экспериментальному зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных минералов определены их основные парамагнитные характеристики. Установлено, что слабомагнитные элементы S, As, Cu, O уменьшают магнитные характеристики железа.

Литературы:

1. А.В. Ладынин. Физические свойства горных пород. Новосиб. Гос. Унив-т. Новосибирск. 2010. -101 с.
2. Кувандиков О.К., Шакаров Х.О., Иргашев К.М. // В сб.: Оптико-акустические, электрические, магнитные исследования конденсированных сред. –Самарканд. 1982. –с. 122-130.
3. Невзорова Э.Г., Гельтеков Б.П., Раводский И.З., Гельд П.Б. Магнитная восприимчивость никеля и железа при высоких температурах // Изд. вузов. Черная металлургия, 1972, №9. сс. 105-109.
4. Довгополь С. Г., Радовский И.З., Гельд П.В. Влияние плавления на магнитных характеристики, железа, кобальта и никеля. 1973, Т.212, №1. сс. 83-85.
5. О.К. Kuvandikov, Н.О. Shakarov, D.A. Sayfullayeva, M.K. Salakhitdinova. Investigations of magnetic properties of compounds of rare-rarth metals mith metals of the iron group in the range of the solid-liquid Pahase transition // The Physics of Metals and Metallography. 2002, vol.93, Suppl. 1, pp.548-553.