

УДК 53.03

Теут А.О.<sup>1</sup>, Куленова Н.А.<sup>2</sup>



Теут А.О.

<sup>1</sup>ДГП «ВНИИцветмет», ул. Промышленная, 1,  
Усть-Каменогорск, 070002, Республика Казахстан  
<sup>2</sup>ВКГТУ им. Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, 19,  
Усть-Каменогорск, 070012, Республика Казахстан



Куленова Н.А.

**РОЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА  
В ПРОЦЕССАХ САМООРГАНИЗАЦИИ  
ПОЛИСУЛЬФИДНЫХ РУД**

*Целью работы являлось изучение взаимосвязи электрических и химических параметров рудных тел и их роли в восстановлении равновесного состояния геосистемы. Исследование проводили путем изучения вещественного состава, электрических и тепловых свойств полисульфидных руд и закономерностей их изменения при нарушении стабильности геологического образования. Установлена тесная корреляция электрофизических и электрохимических свойств сульфидных минералов. Показано, что явления синергизма способствуют восстановлению нарушенного равновесия между вещественной и энергетической составляющими рудной системы, происходящему вследствие развития электрохимических реакций и термоэлектрического эффекта, что приводит к интенсивному формированию зоны окисления. Результаты исследования могут быть использованы для управления процессами переработки рудного сырья и предотвращения его самовозгорания.*

**Ключевые слова:** полисульфиды, синергизм, зона окисления, равновесие геосистемы, электрический диполь, гальванопара, термоЭДС.

*The purpose of this work was to study the correlation between the electrical and chemical parameters of ore bodies and their role in the restoration of geosystem balanced state. The investigation was concerned with studying the material composition, the electrical and thermal properties of polysulfide ores and the laws of their change with a destabilization of geological formation. A close correlation between the electrophysical and electrochemical properties of sulfide materials has been established. It has been shown that synergism effects contribute to restoration of a disbalance between the material and energy components of the ore system due to development of electrochemical reactions and thermoelectric effect resulting in the active formation of oxidation zone. The results of research can be used to control the processes of crude ore treatment and to prevent its self-ignition.*

**Key words:** polysulfides, synergism, oxidation zone, geosystem stability, electric dipole, galvanocouple, thermoEMF.

**Введение**

Природные тела, в том числе и геологические, по определению академика В.И. Вернадского, являются образованиями, объединяющими две сути: вещественную и энергетическую. Они находятся в тесной корреляционной связи и при стабильных внешних условиях – в состоянии равновесия. При изменении внешних условий в природных системах

это равновесие нарушается, вследствие чего возникают процессы, направленные на его восстановление при новом состоянии внешней среды. Синергетические явления отчетливо прослеживаются по результатам анализа вещественных характеристик рудных тел, слагающих их рудных минералов, электрофизических, электрохимических свойств этих образований и генерируемых ими электрических полей [1, 2].

### **Природа энергетических явлений**

Существуют два основных типа причин нарушения стабильности геологических систем: природный, связанный с развитием различных геодинамических, метаморфологических и т.п. процессов, и антропогенный, вызванный технологической деятельностью человека.

Рудные залежи и тела колчеданно-полиметаллических месторождений неоднородны по распределению в них вещественных и физико-химических параметров, что обусловлено полигенностью и полихронностью их формирования. При формировании рудных тел месторождений в несколько стадий распределение руд в них имеет зональное строение, в виде полос либо слоев. При этом в каждой зоне рудные минералы характеризуются только им присущими физико-химическими свойствами, что приводит к резкому различию электрофизических свойств сформировавшихся слоев. Благодаря этому в энергетическом плане они представляют собой естественные термоэлектрические элементы в сочетании с находящимися на различных иерархических уровнях микро- и макрогальваническими элементами. В природных условиях такие термоэлектрические элементы, как правило, располагаются большей частью субсогласно с залеганием рудных тел. Чем больше разность температур на концах этих элементов, тем с большей ЭДС они генерируют ток.

Сформировавшиеся месторождения на протяжении многих миллионов лет пребывают в стабильных условиях при равновесном состоянии между вещественными и энергетическими составляющими. В случае слепых рудных тел разница температур верхней и нижней части определяется температурным градиентом Земли. В условиях Рудного Алтая эта разность температур при вертикальном падении рудного тела и его протяженности до 2 км составляет 20 – 30 °С. При такой разности температур интенсивность возникающего электрического поля не превышает десятых долей микровольт и томотоки незначительны.

При выходе на эрозионный срез изменяются условия (влажность, концентрация кислорода и т.п.) окружающей среды для микро- и макрогальванических элементов, что инициирует развитие электрохимических реакций с образованием вторичных минералов. Этот процесс сопровождается выделением тепла и разогревом верхней части рудного тела до температуры более 100 – 150 °С (увеличение практически в 5 раз). Следствием создания мощного теплового градиента является возникновение значительного термоэлектрического эффекта и переформирование естественной дипольной электрической системы: сменяется положение участка разогрева рудного тела и значительно увеличивается разность потенциалов верхнего и нижнего диполей. Если в первом случае область нагрева была сосредоточена в зоне выклинивания, то во втором случае она перемещается в голову рудного тела. При этом в связи с большой разностью температур верхней и нижней областей рудных тел интенсивность естественного электрического поля намного превосходит интенсивность электрических полей рудных тел, находящихся в стабильном состоянии. На таких месторождениях хорошо развита зона окисления, формирование которой связано с приведением вещественной и энергетической составляющих в состояние равновесия, нередко являющаяся очагом возникновения сульфидных пожаров.

Антропогенные причины, приводящие к нарушению стабильности геологических систем при добыче и переработке руд, представляются в виде непрерывного процесса, включающего последовательные стадии вскрытия рудных тел и залежей горными выработками; выемки горнорудной массы; складирования массы на рудных складах рудников и обогатительных фабрик; подготовки шихты к обогащению; обогащения; дальнейшей переработки.

При вскрытии рудной залежи горными выработками возникают явления синергизма, аналогичные явлениям, возникающим при выходе рудного тела на эрозионный срез. Наиболее ярко синергизм проявляется в очагах самовозгорания руд. Эти процессы сначала возникают в рудах, обогащенных микрогальваническими элементами. Температура в очагах возгорания достигает 90–110 °С, что способствует запуску в работу локальных термоэлементов. Термоэлектрики, являющиеся результатом работы термоэлектрического элемента, в свою очередь оказывают существенное влияние на работу микро- и макрогальванических элементов и интенсифицируют процессы окисления. Следствием работы описанной системы электрических элементов является образование вторичных минералов.

При выемке руды нарушается равновесие между вещественной и энергетической составляющими в кусках отбитой горнорудной массы. Переход к новому стабильному состоянию на этом этапе сопровождается явлениями самоорганизации, направленными на установление равновесия путем преобразования вещественной составляющей под воздействием микро- и макрогальванических элементов. Преобразование вещественной составляющей изменяет, в свою очередь, энергетическую составляющую, уничтожая часть естественных гальванических элементов.

Явления синергизма наблюдаются также в рудных штабелях усреднительных складов рудников и обогатительных фабрик при послойном формировании руд с различными электрофизическими (электрохимическими) свойствами. Дробление и измельчение руд при подготовке их к флотации увеличивает суммарную поверхность естественных гальванических элементов, что интенсифицирует их работу.

## **Результаты исследования состава и свойств руд**

В настоящей работе представлены результаты изучения колчеданно-полиметаллических и золотосульфидных месторождений Рудного Алтая, характерной особенностью которых является их полигенность. Показано [3, 4], что каждый из этапов формирования таких месторождений протекал при особых, присущих только этой стадии термобарогеохимических условиях. Это определило зональное распределение природных типов руд в пределах рудных тел, а также полиморфизм одноименных минералов и, соответственно, примесный состав и количественные соотношения в них примесей. В таблицах 1 и 2 приведены составы различных типов руд и распределение примесей по глубине залегания рудной залежи. Отклонения формы кристаллической решетки минералов (в т.ч. и одноименных) от идеальной, а также различный состав примесей в них являются причиной различия их электрофизических свойств.

По своим электрофизическим свойствам сульфидные минералы относятся к полупроводникам. С этим прямым образом связано положение уровня Ферми в поверхностных слоях минералов-полупроводников, определяющего такую важную характеристику поверхности, как электродный потенциал, представляющий скачок потенциала на границе минерала с ионной средой (например, выщелачивающим раствором) или другим минералом, образующим с ним сросток.

Таблица 1

Химический состав типичных руд золотосодержащих месторождений  
Восточного Казахстана

Компоненты	Содержание, % (масс.)		
	Среднее для верхних горизонтов	Глубокие горизонты (участок «Центральный»)	Глубокие горизонты (участок «Промежуточный»)
$SiO_2$	60.0 – 65.0	66.0 – 67.0	55.0 – 56.0
$Fe_{общ.}$	4.1 – 4.3	5.0 – 6.0	2.8 – 3.0
$Al_2O_3$	12.1 – 12.5	12.0 – 13.0	14.0 – 15.0
$CaO$	1.0 – 2.0	2.0 – 2.1	2.2 – 2.3
$MgO$	1.0 – 2.0	1.3 – 1.4	1.4 – 1.5
$Cu$	0.010 – 0.015	0.01 – 0.015	0.010 – 0.015
$Pb$	0.04 – 0.07	–	0.001 – 0.0015
$Zn$	0.10 – 0.15	0.009 – 0.011	0.007 – 0.009
$As$	0.90 – 0.93	1.0 – 1.1	0.6 – 0.7
$Sb$	0.05 – 0.07	0.05 – 0.07	0.01 – 0.02
$S_{общ.}$	1.85 – 1.90	1.3 – 1.4	1.8 – 1.9
$S_{сульфид.}$	1.65 – 1.68	1.2 – 1.3	–
$C$	3.0 – 3.5	1.2 – 1.3	2.1 – 2.5
$Au$ , г/т	9.0 – 10.0	10.0 – 11.0	8.0 – 9.5
$Ag$ , г/т	3.3 – 3.6	1.0 – 2.0	–

В таблицах 3 и 4 приведены электрофизические свойства рудных минералов основных месторождений Рудного Алтая [5]. Оценки полупроводниковых свойств минералов осуществлены на основании результатов измерения термоэлектрических, гальваномагнитных эффектов, электрической проводимости и изучения вольт-амперной характеристики минералов. Как видно, термоЭДС ( $T_{эдс}$ ) и удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ) минералов изменяются в широких пределах. Наибольшим диапазоном изменения отличаются сульфиды железа (пирит, марказит), составляющие, как правило, матрицу колчеданно-полиметаллических и золотосульфидных руд (от 60 до 95 % минерального состава). Среди них отмечаются разновидности, обладающие как электронной, так и дырочной проводимостью.

Халькопириты преимущественно характеризуются электронной проводимостью. Зерна с дырочной проводимостью отмечаются крайне редко в метаморфизованных рудах Малевского месторождения.

Галенит из руд изученных месторождений обладает в основном электронной проводимостью. В рудах Орловского, Малевского и Тишинского месторождений иногда отмечаются зерна с дырочной проводимостью.

Таблица 2

*Химический состав различных типов руд Николаевского месторождения*

Компонент	Руды кристаллические			Руды метакolloидные	
	серно- колчеданные	колчеданные медные	колчеданные медно- цинковые	колчеданные медно- цинковые	колчеданные цинковые
<i>Cu</i> , %	2.5	7.8	23.4	25.45:8	9.95
<i>Pb</i> , %	0.55	0.5	1.1	4.8	4.55
<i>Zn</i> , %	1.55	3.25	11.65	26.45:5	37.1
<i>S</i> <sub>сульфат.</sub> , %	2.03	0.44	0.48	0.84	2.03
<i>S</i> <sub>общ.</sub> , %	44.89	37.99	43.96	46.00	40.53
<i>Fe</i> <sub>общ.</sub> , %	39.39	32.50	34.49	38.58	31.75
<i>Al</i> <sub>2</sub> <i>O</i> <sub>3</sub> , %	2.41	1.75	0.34	1.36	0.17
<i>BaO</i> , %	0.06	0.86	0.11	2.3	4.56
<i>CaO</i> , %	0.36	0.13	0.08	0.15	0.07
<i>MgO</i> , %	0.20	0.54	0.13	0.48	0.14
<i>Bi</i> , %	0.01	0.0021	0.008	0.012	0.0062
<i>Ga</i> , %	0.001	0.00044	0.0003	0.002	–
<i>Ge</i> , %	не обн.	0.0002	0.00032	0.0005	0.0002
<i>In</i> , %	не обн.	0.0001	0.00005	0.0009	0.0009
<i>Cd</i> , %	0.002	0.0108	0.004	0.014	0.003
<i>Mo</i> , %	0.002	0.0018	0.002	0.002	0.0018
<i>As</i> , %	0.07	0.11	0.10	0.22	0.22
<i>Ni</i> , %	сл.	0.00098	0.0009	0.0012	0.0038
<i>Sn</i> , %	0.001	0.003	0.003	0.009	0.010
<i>Sb</i> , %	0.004	0.0032	0.002	0.0016	0.022
<i>Se</i> , %	–	0.009	сл.	0.006	сл.
<i>Tl</i> , %	0.0005	0.0029	сл.	0.004	0.004
<i>Te</i> , %	0.0020	0.00174	сл.	0.001	0.0016
<i>Ti</i> , %	–	0.0106	0.082	–	0.042

Таблица 3

Электрофизические свойства основных рудных минералов Николаевского  
и Орловского месторождений

Минералы	Месторождения					
	Николаевское			Орловское		
	$T_{\text{ЭДС}}$ , мВ/град		$\rho$ , Ом·м	$T_{\text{ЭДС}}$ , мВ/град		$\rho$ , Ом·м
	<i>n</i> - проводимость ( $-T_{\text{ЭДС}}$ )	<i>p</i> - проводимость ( $+T_{\text{ЭДС}}$ )		<i>n</i> - проводимость ( $-T_{\text{ЭДС}}$ )	<i>p</i> - проводимость ( $+T_{\text{ЭДС}}$ )	
Марказит	–	$\frac{0.1; 9.0}{2.43}$	$\frac{5 \cdot 10^{-3}; 3.4}{-}$	–	–	–
Пирит	$\frac{18; 7}{13}$	$\frac{7; 28}{16.22}$	$\frac{12.5 \cdot 10^{-4}; 1.8}{3.5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{18; 6}{12}$	$\frac{0.1; 15}{7.8}$	$\frac{9.4 \cdot 10^{-4}; 1.1}{4.18 \cdot 10^{-2}}$
Халькопирит	$\frac{48; 20}{32}$	–	$\frac{1.8 \cdot 10^{-4}; 0.81}{5.1 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{32; 18}{28}$	–	$\frac{9.7 \cdot 10^{-4}; 0.14}{2.3 \cdot 10^{-3}}$
Сфалерит	$\frac{3.0^*; 0}{-}$	$\frac{0.1; 2.5^*}{-}$	$\frac{3.1 \cdot 10^{-2}; 48 \cdot 10^4}{9.2 \cdot 10^3}$	$\frac{8.2^*; 0}{-}$	$\frac{0.2; 12^*}{-}$	$\frac{0.16; 1.1 \cdot 10^7}{5 \cdot 10^5}$
Галенит	$\frac{42; 5}{28}$	–	$\frac{7.2 \cdot 10^{-4}; 0.1}{-}$	$\frac{48; 0}{32}$	$\frac{0.1^*; 3.4^*}{-}$	$\frac{13.2 \cdot 10^{-5}; 0.72}{-}$
Пирротин	–	$\frac{8; 32}{-}$	$\frac{2.8 \cdot 10^{-6}; 0.7}{-}$	–	–	–
Мельниковит; мельниковит- пирит	–	$\frac{12; 27}{18}$	$\frac{6.7 \cdot 10^{-2}; 1.42}{0.35}$	–	–	–

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значения соответственно, в знаменателе – среднее значение;  
\* – имеет ограниченное распространение.

ТермоЭДС сфалеритов редко превышает десятые и даже сотые доли мВ/град. При этом большей частью фиксируется дырочная проводимость. В рудах Николаевского месторождения изредка отмечаются разновидности сфалерита (марматит с повышенным содержанием железа), характеризующиеся значением термоЭДС в пределах 5 – 9 мВ/град.

Таким образом, изучаемые руды представляют собой сложный электрод, “состоящий из отдельных минеральных электродов, имеющих относительно положительные и отрицательные значения электродного потенциала” [6]. При этом минералы электрохимически взаимодействуют между собой и образуют сложные микрогальванические элементы. Экспериментальные исследования по моделированию работы гальванических элементов, образованных природными сростками минералов, показали [5], что электродные потенциалы зерен в составе полиминеральных руд значительно отличаются от стационарных потенциалов изолированных мономинералов (таблица 5).

Таблица 4

*Электрофизические свойства основных рудных минералов Тишинского  
и Малеевского месторождений*

Минералы	Месторождения					
	Тишинское			Малеевское		
	$T_{\text{ЭДС}}$ , мВ/град		$\rho$ , Ом·м	$T_{\text{ЭДС}}$ , мВ/град		$\rho$ , Ом·м
	<i>n</i> - проводимость ( $-T_{\text{ЭДС}}$ )	<i>p</i> - проводимость ( $+T_{\text{ЭДС}}$ )		<i>n</i> - проводимость ( $-T_{\text{ЭДС}}$ )	<i>p</i> - проводимость ( $+T_{\text{ЭДС}}$ )	
Пирит	$\frac{30; 16}{21}$	$\frac{2; 13}{6}$	$\frac{14 \cdot 10^{-4}; 8.1}{0.24}$	$\frac{17; 0}{8}$	$\frac{0.1; 27}{-}$	$\frac{1.1 \cdot 10^{-4}; 0.13}{8.4 \cdot 10^{-2}}$
Халькопирит	$\frac{48; 20}{32}$	-	$\frac{3.6 \cdot 10^{-4}; 1.3 \cdot 10^{-2}}{15 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{42; 20}{22}$	$\frac{0.1^*; 3.8^*}{-}$	$\frac{4.6 \cdot 10^{-5}; 4.8 \cdot 10^{-2}}{2.5 \cdot 10^{-3}}$
Сфалерит	$\frac{-}{0.4^*}$	$\frac{-}{0.9^*}$	-	$\frac{0.8; 0}{-}$	$\frac{0.27; 6.3^*}{-}$	$\frac{1.8 \cdot 10^3; 9.3 \cdot 10^6}{-}$
Галенит	$\frac{34; 18}{-}$	$\frac{6^*; 18^*}{-}$	-	$\frac{49; 16}{32}$	$\frac{1.4^*; 3^*}{-}$	$\frac{8.8 \cdot 10^{-5}; 2.6 \cdot 10^{-3}}{-}$
Пирротин	-	-	-	-	$\frac{2.4; 12}{-}$	$\frac{3.1 \cdot 10^{-5}; 6.6 \cdot 10^{-3}}{2.8 \cdot 10^{-4}}$

Примечание. Обозначения те же, что и в таблице 3

Таблица 5

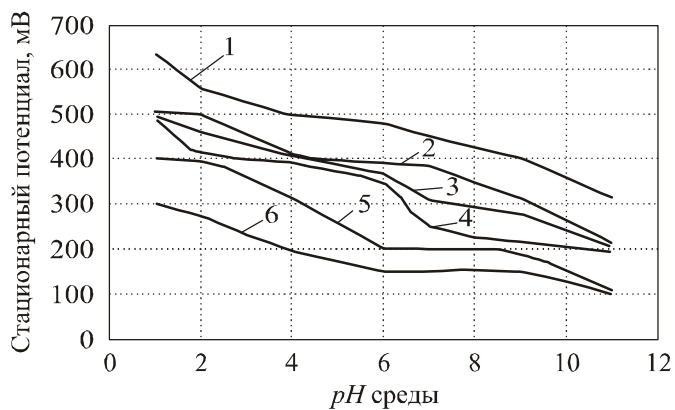
*Влияние гальванического элемента «сфалерит – халькопирит» из руд Николаевского  
месторождения на переход в раствор меди и цинка*

Эксперимент	Минералы	Содержание в растворе, мг/дм <sup>3</sup>			
		без аэрации пульпы		с аэрацией	
		<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
1	Халькопирит – сфалерит	$\frac{0.31}{0.49}$	$\frac{1.57}{1.77}$	$\frac{0.35}{0.54}$	$\frac{1.70}{1.85}$
		$\frac{0.18}{0.23}$	$\frac{0.64}{0.77}$	$\frac{0.20}{0.25}$	$\frac{0.75}{0.88}$
2	Халькопирит, сфалерит	$\frac{0.17}{0.19}$	-	$\frac{0.18}{0.19}$	-
3	Халькопирит ( <i>n</i> -тип)	-	$\frac{0.21}{0.28}$	-	$\frac{0.25}{0.33}$
4	Сфалерит ( <i>p</i> -тип)	-	-	-	-

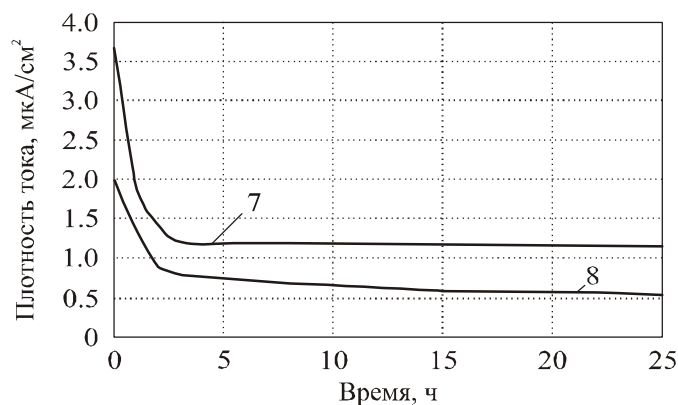
Примечание. В числителе – через 24 ч, в знаменателе – через 48 ч.

Из таблицы 5 видно, что при образовании короткозамкнутой гальванопары (эксперимент 1) переход в раствор меди и цинка увеличивается почти в два раза по сравнению с отдельным выщелачиванием халькопирита и сфалерита (эксперименты 3 и 4). Некоторое повышение извлечения в раствор металлов при совместном нахождении в нем неконтактирующих электродов халькопирита и сфалерита (эксперимент 2) связано, по-видимому, с образованием

ионной электрической связи. На рис. 1 показано изменение электродных потенциалов на различных минеральных электродах в кислой и щелочной средах. Ход потенциальных кривых указывает на то, что работа гальванопар контролируется анодным процессом, торможение которого обусловлено как продуктами непосредственного окисления сульфидов, так и вторичных реакций на анодной поверхности, особенно в щелочной среде.



а)



б)

Рис. 1. Результаты измерения стационарных электродных потенциалов основных минералов Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения при различных значениях рН среды (а) и изменение плотности тока гальванопары халькопирит-сфалерит во времени, мВ/град (б): пирит: 1) +14; 2) –6.3; 3) –15; халькопирит: 4) –21; 5) –60; сфалерит: 6) –2.5; 7) с продувкой воздуха; 8) без продувки.

Процессы электрохимического окисления, связанные с работой микрогальванических элементов, достаточно широко распространены в природе при формировании зон гипергенеза. Электрохимические процессы и процессы химического окисления взаимосвязаны и взаимно усиливают друг друга. Сила тока гальванопар, изготовленных из минеральных электродов (имитирующих природные сростки), в условиях активной аэрации, способствующей химическому окислению минеральной поверхности, увеличивается (для случая на рис. 1 (б) приблизительно в 2 раза). Генерируемые электрохимические токи в свою очередь усиливают химическое окисление электродов, сопровождающееся образованием вторичных минералов (рис. 2). При этом установлено, что электрохимические свойства (электродный потенциал) и



коэффициент термоЭДС, зависящий от особенностей кристаллической структуры минерала, характера вхождения примесных атомов в кристаллическую решетку сульфидов, находятся в тесной корреляционной связи [7].

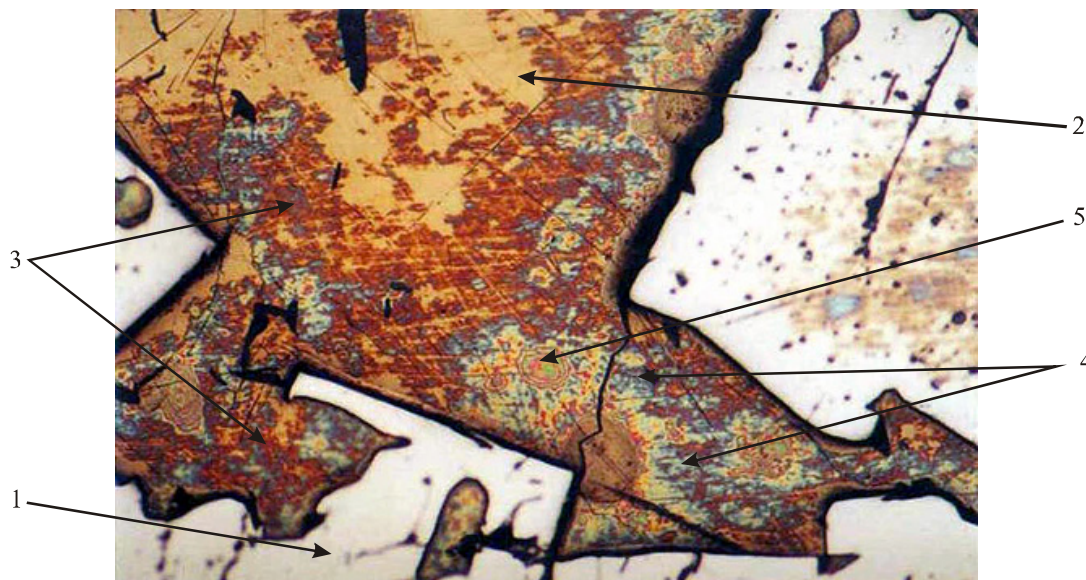


Рис. 2. Результат работы микрогальванических элементов, сформированных пиритом р-типа проводимости (поз. 1, светло-желтый, рельефный) и халькопиритом n-типа проводимости (поз. 2, оранжевый, окисленный) в руде Рубцовского месторождения: борнит (поз. 3, кирпично-красный), ковеллин (поз. 4, синий), халькозин (поз. 5, малиновый).

Тот факт, что пириты количественно преобладают в полисульфидных рудах, позволяет выделить их как минерал, в наибольшей мере отвечающий за полупроводниковые свойства руд. Из сравнения состава пиритов метаколлоидных и кристаллических руд в таблице 6 следует, что несмотря на одинаковый набор, концентрация примесных элементов отличается значительно, а зависимость термоЭДС пиритов от содержания в них отдельных элементов (рис. 3) позволяет сделать заключение о примесной природе проводимости сульфидов железа. Отсюда следует, что существует определенная связь между термоэлектрическими характеристиками пиритовых матриц руд и содержащихся в них микросистем из минералов носителей (сфалерит, халькопирит) с эмульсионными или микровкрапленными включениями других минералов (пирит, халькопирит, галенит).

Таблица 6

Содержание основных элементов-примесей в пиритах руд Николаевского месторождения

Элементы	Кристаллические руды, $n \cdot 10^{-4} \%$	Метаколлоидные руды, $n \cdot 10^{-4} \%$
Медь	1568.7	523.5
Цинк	430.0	318.8
Свинец	78.9	617.9
Серебро	6.2	47.9
Кобальт	286.4	31.8
Никель	80.7	10.6
Мышьяк	534.1	1169.7
Титан	218.4	674.3

Для характеристики термоэлектрических свойств руд П.С. Ревякиным [8] предложен термин «эффект Зеебека», обозначающий суммарную величину термоЭДС минералов в руде, которая является результирующей этого параметра при одновременном измерении величины термоЭДС зерен кристаллов, слагающих руды (в т.ч. имеющих различный тип проводимости), и пропорциональна доле участия и величине термоЭДС кристаллов преобладающего знака.

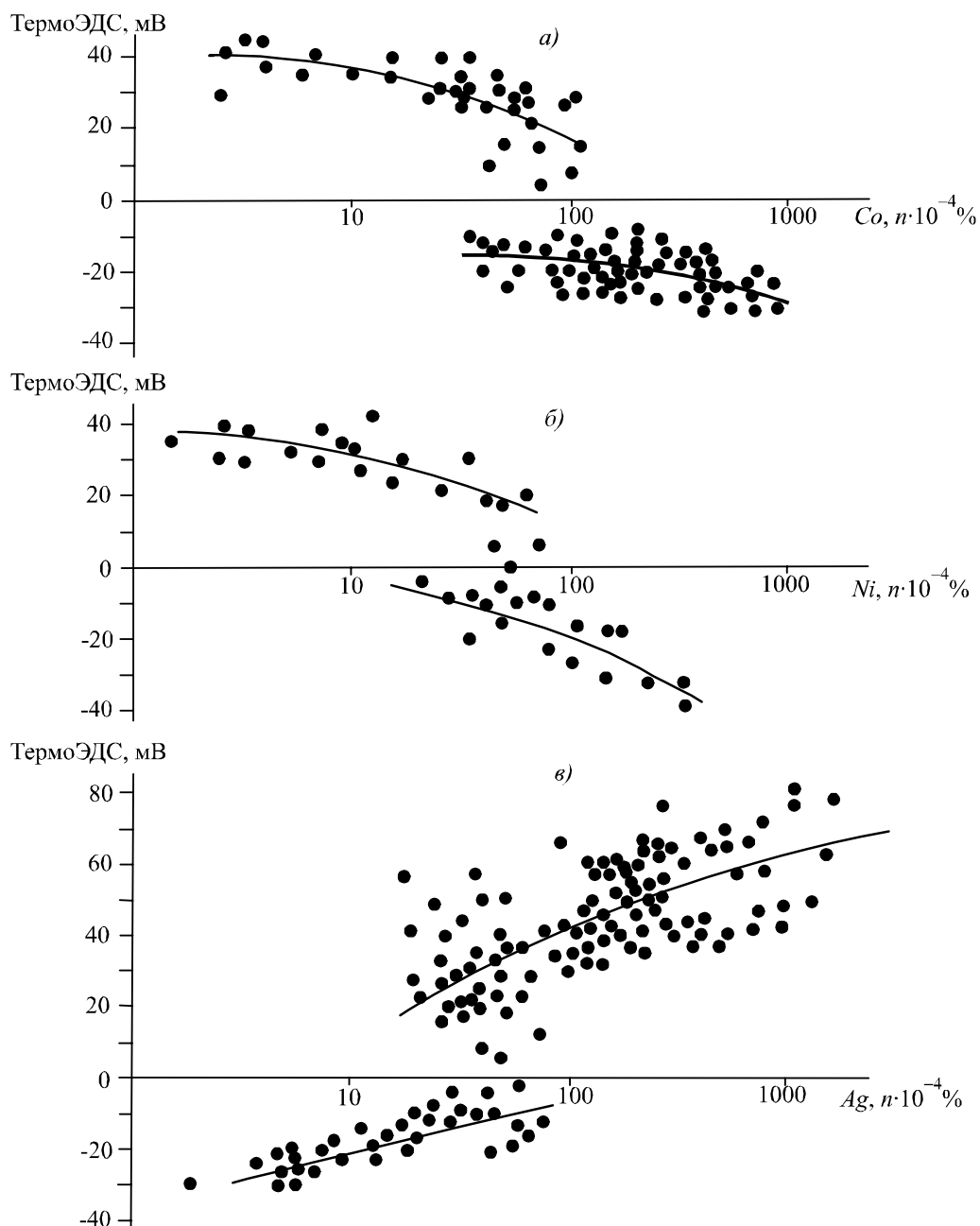


Рис. 3. Корреляционная зависимость электрофизических свойств дисульфидов железа Николаевского месторождения от содержания элементов-примесей (а – зависимость термоЭДС пиритов от содержания кобальта; б – то же, от содержания никеля; в – то же, от содержания серебра).

Практическое применение этого параметра позволяет не только выделять и проследивать в горных выработках различные технологические типы сульфидных руд (рис. 4, таблица 7), но и локализовать зоны, соответствующие разным стадиям рудообразования месторождений (рис. 5).

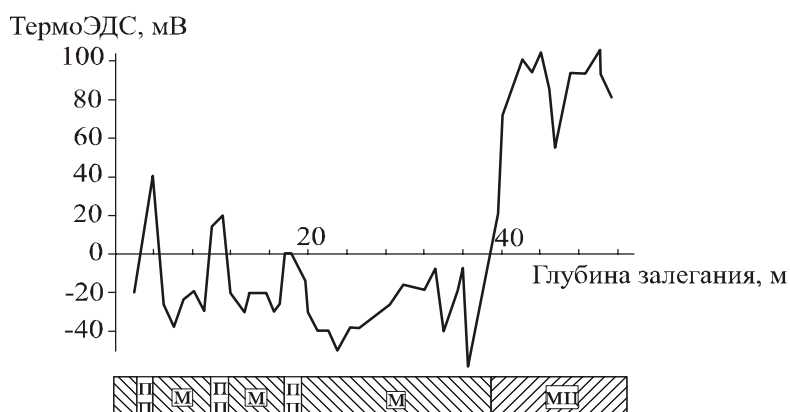


Рис. 4. Результаты измерений эффекта Зеебека в карьере Николаевского рудника:

М – кристаллические медноколчеданные руды;

МЦ – метакolloидные медно-цинковые руды;

П – прожилки барит-полиметаллических руд.

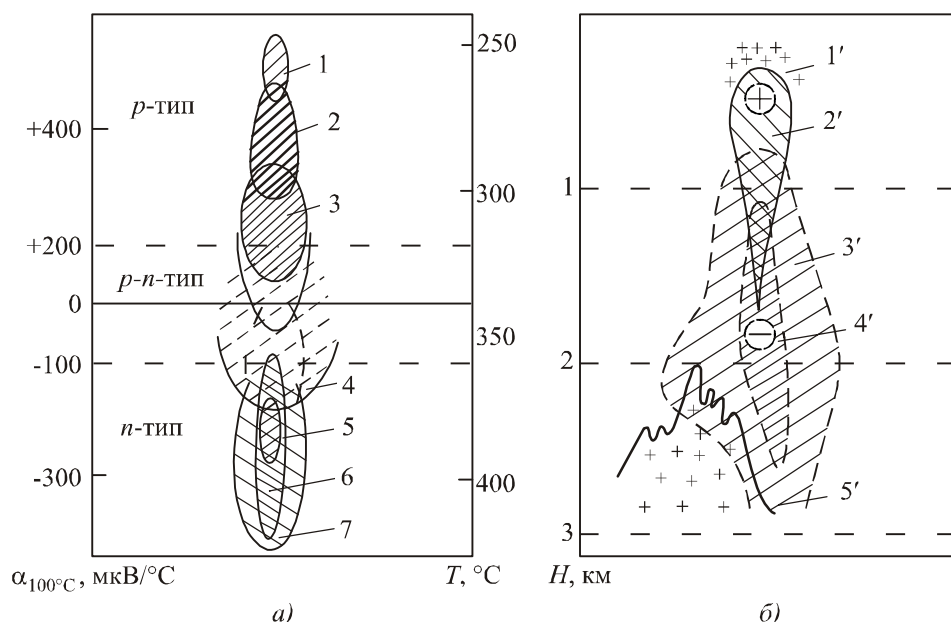


Рис. 5. Схема зависимости термоЭДС от температуры кристаллизации пиритов (а)

и схема сквозъярусной зональности электрических свойств пиритов колчеданно-полиметаллических месторождений (б).

Области: 1 – низкотемпературных барит-полиметаллических руд;

2, 3 – среднетемпературных, соответственно полиметаллических и медно-цинковых руд;

4 – хлорит-кварцевых метасоматитов зоны железно-магнезиального метасоматоза;

5, 6 – относительно высокотемпературных, соответственно колчеданных и медно-колчеданных руд;

7 – серицит-кварцевых метасоматитов зоны кислотного выщелачивания.

Области изменения электрических свойств: 1' – барит- и карбонат-полиметаллических прожилков с пиритами р-типа; 2' – хлоритовых метасоматитовых кварцитов с пиритами р-типа;

3' – серицит-кварцевых метасоматитов с пиритами n-типа (внешняя зона);

4' – то же, внутренняя зона; 5' – гранитоиды. Знак “+” соответствует положительным значениям термоЭДС, знак “-” – отрицательным.

*Таблица 7*

*Эффект Зеебека руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая*

Месторождение, природные типы руд	Тип проводимости, мкВ/град	
	преобладание электронной проводимости	преобладание дырочной проводимости
Николаевское месторождение		
Метаколлоидные руды	– ———— –	98; 510 ———— 275
Переходные руды	–258; –0.63 ———— –125	18.7; 420 ———— 110
Кристаллические руды	– 520; –110 ———— – 315	– ———— –
Орловское месторождение		
Полиметаллические руды	–480; –18 ———— –276	5; 520 ———— 206
Медно-колчеданные руды	–590; –127 ———— –360	– ———— –
Малеевское месторождение		
Полиметаллические руды	–510; –12.8 ———— –260	34; 490 ———— 211
Медно-цинковые руды	–605; –208 ———— –418	– ———— –
Рубцовское месторождение		
Полиметаллические руды	–390; –23 ———— –186	11.8; 620 ———— 316
Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значения соответственно, в знаменателе – среднее значение.		

Из приведенных данных видно, что природные типы руд характеризуются отличными друг от друга электрофизическими свойствами. Примером такого распределения являются руды Николаевского месторождения. В рудной залежи этого месторождения выделяются по электрофизическим свойствам зоны с преобладающей дырочной проводимостью, с преобладающей электронной проводимостью и со смешанной проводимостью. Локализация контактирующих скоплений руд с различным типом проводимости обуславливает образование естественных термоэлектрических элементов.

Особенностью технологических свойств изученных руд является следующее:

– в совокупности природные микрогальванические и термоэлектрические элементы в потенциалобразующей среде являются причиной возгорания сульфидных руд в естественном

их залегании и на рудных складах или в отвалах. Выделение в скважинах и горных выработках на различных стадиях разведок руд с различными электрофизическими свойствами позволяет оценить их пожароопасность [9]. Установлено, что если потенциал образования естественного электрического поля составляет  $500 \div 700$  мВ, то опасность возгорания месторождения велика;

– присутствие естественных микрогальванических элементов (сростков) в рудах негативно влияет на протекание процессов флотации, вследствие чего уже по результатам определения электрофизических свойств можно выделять труднообогатимые руды;

– электрохимические реакции, возникающие при работе природных термоэлектрических и микрогальванических элементов, благоприятно влияют на процессы гидрометаллургического обогащения, интенсифицируя процессы окисления. Благодаря этому появляется возможность еще на стадии исследования электрофизических свойств оценить целесообразность применения для обогащения руд гидрометаллургического метода.

## Выводы

Геологические образования, как и любые природные тела, стремятся к сохранению состояния равновесия. Любые внешние воздействия, вызывающие нарушение стабильности геосистемы, инициируют отклик в форме химических и энергетических процессов в кристаллической массе, направленных на восстановление равновесия.

Электрофизические свойства сульфидных минералов, в силу особенностей вещественного состава и структуры принадлежащих к классу полупроводников, играют значительную роль как в становлении, так и в жизненном цикле месторождений колчеданно-полиметаллических и упорных пиритных и арсенопиритных золотосодержащих руд. Зональное строение таких месторождений соответствует термобарогеохимическим условиям образования минералов на каждой стадии формирования рудного тела. При изменении внешних условий стабильного существования полисульфидной рудной залежи, попадания головной ее части в зону эрозионного среза или вскрыши, подвергающейся воздействию потенциалобразующей среды (вода, атмосферный воздух), процесс химического окисления рудных минералов усиливается действием вступающих в работу микрогальванопар (сростков минералов с разным типом проводимости). Возникающие электрохимические токи многократно усиливают окислительный процесс, что существенно повышает температуру рудного тела в зоне окисления. В результате не только изменяется на противоположное направление градиента температуры (до этого определяемого геотермальным нагревом в зоне выклинивания рудного тела), но и значительно возрастает сама величина градиента. Возникает синергетический эффект, проявляющийся в работе термоэлемента, образованного рудными слоями с разным типом проводимости. Генерируемые им токи формируют электрическое поле с дипольной структурой, активизируя работу естественных гальванопар и интенсифицируя процесс окисления минералов. Такой самоорганизующий процесс длится до тех пор, пока не произойдет полное преобразование сульфидных минералов, контактирующих с потенциалобразующей средой, во вторичные и не установится новое равновесие между вещественной и энергетической составляющими геологической системы.

Полупроводниковые свойства сульфидов являются важнейшей характеристикой руд колчеданно-полиметаллических месторождений. В совокупности с другими геофизическими методами оценки параметров (электродных потенциалов, ранней стадии вызванной поляризации), контактного способа поляризационных кривых, измерение термоэлектрических свойств руд и рудных минералов позволяет получить информацию об онтогении, генезисе

месторождения, полезную при поисках, разведке и оценке разведанных месторождений. С другой стороны измерения термоЭДС позволяют классифицировать руды по технологическим типам и свойствам, прогнозировать характер протекания процессов переработки руд, в частности, флотационного и гидрометаллургического методов обогащения, оценивать степень пожарной опасности полисульфидных месторождений.

Авторы выражают глубокую признательность проф. В.Д. Борцову и другим сотрудникам ВНИИцветмета за предоставление материалов для настоящей публикации.

## **Литература**

1. Плаксин И.Н. Некоторые вопросы теории и технологии взаимодействия реагентов с минералами. Флотационные свойства полупроводниковых минералов / И.Н. Плаксин – М.: Недра, 1966. – С. 5 – 10.
2. Плаксин И.Н. Взаимосвязь энергетического строения кристаллов минералов с их флотационными свойствами / И.Н. Плаксин, Р.Ш. Шафеев, В.А. Чантурия // Труды VIII Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых – Л.: Механобр, 1969. – Т. 2 – С. 235 – 245.
3. Попов В.В. Полиметаллические месторождения Рудного Алтая. / В.В. Попов, Н.И. Стучевский, Ю.И. Демин – М.: Недра, 1995. – 414 с.
4. Горжевский Д.И. Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая, их происхождение и методы поисков. / Д.И. Горжевский, В.Б. Чекваидзе, И.З. Исаакович – М.: Недра, 1977. – 197 с.
5. Естественные гальванические элементы в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / В.Д. Борцов, В.П. Наумов, Л.Б. Кушакова [и др.] // Цветные металлы. – 2004. – № 6. – С. 11 – 14.
6. Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. / Г.Б. Свешников – Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. – 160 с.
7. Некоторые особенности процессов окисления на золотосульфидных и колчеданно-полиметаллических месторождениях в Восточном Казахстане / В.Д. Борцов, Н.В. Сулаквелидзе, Д.В. Титов [и др.] // Геология и охрана недр. – 2008. – № 3. – С. 72 – 76.
8. Ревякин П.С. Электрические свойства пиритов и их поисковое значение / П.С. Ревякин, Э.А. Ревякина // Разведка и охрана недр. – 1978. – № 7. – С. 45 – 50.
9. Патент 41667 Республика Казахстан. Способ установления потенциальной пожароопасности колчеданно-полиметаллических руд/Борцов В.Д., Дегтярь Н.И., Михеев А.А., Сулаквелидзе Н.В., Кушакова Л.Б., Наумов В.П., Филатов А.С.; опубл. 15.10.04.

Поступила в редакцию 02.07.2012.