

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ «УСЛОВИЯ  
ОБРАЗОВАНИЯ – СОСТАВ – ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА»  
СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ**

**STATISTICAL SUBSTANTIATION OF THE DEPENDENCE «FORMATION  
CONDITIONS – COMPOSITION – ELECTROPHYSICAL PROPERTIES» OF  
SULPHIDE MINERALS**

*В. Г. Романов, Забайкальский государственный университет, г. Чита  
vgromanov@yandex.ru*

*V. Romanov, Transbaikal State University, Chita*



Определена проблематика работы, связанная со статистическим обоснованием взаимосвязи состава и свойств сульфидных минералов. Изложены теоретические и экспериментальные обоснования связи состава сульфидов с температурой образования минералов и давлением в минералообразующей системе. Обосновано использование корреляционного анализа для выявления наличия и направленности связи состава и свойств сульфидных минералов, приведены ограничения корреляционного анализа. Статистическое обоснование связи состава и свойств сульфидов осуществлено на примере синтезированных галенитов с различным составом и содержанием введенных примесей ( $Sb_2S_3$ ,  $Bi$  и  $Bi_2S_3$ ,  $AgBiS_2$ ), а также природных пиритов Уконикского золоторудного месторождения с различными содержаниями мышьяка. Коррелировались состав и содержание введенной при синтезе примеси с электрофизическими параметрами: термоэлектродвижущей силой, электропроводностью, постоянной Холла и концентрацией носителей тока, рассчитанной по измерениям постоянной Холла. Приводятся сведения о некорректности «валового» подхода при применении корреляционного анализа. Отклонения в направленности выявленной связи от теоретических представлений объясняются соображениями о гетерогенности синтезированных образцов

*Ключевые слова:* минералообразующая среда; состав минералов; матричные элементы; электрофизические свойства; термоэлектродвижущая сила; электропроводность; постоянная Холла; взаимосвязь; элементы-примеси; синтез; изоморфизм; корреляционный анализ; коэффициент корреляции; корреляционное поле; гетерогенность

The problems of work connected with the statistical justification of the relationship between the composition and properties of sulfide minerals have been determined. Theoretical and experimental substantiations of sulfides composition relationship with the temperature of minerals and pressure formation in the mineral-forming system are presented. The use of correlation analysis for the detection of the presence and orientation of the bond between the composition and properties of sulphide minerals is justified, and the limitations of the correlation analysis are given. The statistical substantiation between the sulfides composition and properties relationship was carried out using the example of synthesized galenics with different composition and content of introduced impurities ( $Sb_2S_3$ ,  $Bi$  and  $Bi_2S_3$ ,  $AgBiS_2$ ) and natural pyrite from the Ukonik gold ore deposit with various arsenic contents. The composition and content of the introduced impurity with the synthesis of electro-physical parameters were correlated: thermoelectric power, electrical conductivity, Hall constant, and carrier, calculated from measurements of the Hall constant. The information on the incorrectness of the «gross» approach when applying correlation analysis is provided. The deviations in the direction of the revealed connection from theoretical representations are explained by considerations of heterogeneity of the synthesized samples

*Key words:* mineral-forming environment; composition of minerals; matrix elements; electro-physical properties; thermoelectromotive force; electrical conductivity; Hall constant; interrelation; impurity elements; synthesis; isomorphism; correlation analysis; correlation coefficient; correlation field; heterogeneity

Проблематика статьи вписывается в одно из направлений современной минералогии, изучающих причинно-следственные связи условий образования минералов с их конституцией, морфологией, составом и свойствами. Изучение этих связей способствует нарастающему расширению сфер использования минералов в практической деятельности человека.

Многими исследователями неоднократно предпринимались попытки обоснования взаимосвязи условий образования сульфидных минералов и их различных свойств. Связующим звеном в этой цепи является состав минерала. Он всегда откликается на изменения условий образования и часто существенным образом влияет на многие свойства минералов.

Целевое пространство статьи ограничим только исследованием взаимосвязи состава и свойств сульфидных минералов, оставив вне поля зрения левую часть трехзвенной системы, вынесенной в титульное заглавие, т.к. считаем доказанной связь состава сульфидов с одними из основных показателей условий минералообразования – температурой образования минералов и давлением в минералообразующей системе. Поэтому ограничимся только ссылками, подтверждающими этот тезис.

Веские доводы в его пользу для пирита находим у В. А. Фаворова с соавторами [10], считавшими, что отклонение состава пирита от стехиометрического соотношения связано с изменением парциального давления серы в гидротермальных растворах, зависящего от температуры минералообразования. Подобные выводы получены А. Д. Ракчевым и Л. В. Чернышевым [5]. Микроаналитические определения Fe и S в синтезированных пиритах, проведенные этими авторами, показали, что с ростом температуры синтеза происходит обогащение пиритов Fe и обеднение S.

Более поздние химические и рентгено-спектральные исследования пиритов Дарасунского месторождения показали [13], что пириты, сформированные в условиях закрытой системы, относительно высокого давления и высокой летучести серы, приводят к

отклонению стехиометрического состава в сторону избытка серы.

Также считается доказанной связь наличия элементов-примесей в пирите (Co, Ni, As; реже Mn, Cu и Ni) с условиями его образования [14; 15], причем высокотемпературные условия благоприятны для анионного изоморфизма, при котором  $As^{3-}$  или  $Sb^{3-}$  замещают  $S^{2-}$ , а высокотемпературные – для катионного, когда  $Co^{3+}$  и  $Ni^{4+}$  могут замещать  $Fe^{2+}$  [1; 11]. Доказательства изоморфного вхождения меди в структуру пирита приводят Н. Н. Мозгова [4] и Р. Т. Шуй [12], меди, свинца и цинка – Г. А. Юргенсон [13].

Теперь обратимся к статистическому обоснованию связи состава сульфидных минералов с их электрофизическими параметрами – это, во-первых, экспрессно определяемые и относительно распространенные в геолого-минералогической практике электропроводность и термоэлектродвижущая сила и, во-вторых, постоянная Холла (R) и концентрация носителей тока ( $C_{хол.}$ ), практически не используемые в прикладных целях. В статье используются данные измерений постоянной Холла, выполненные В. М. Лапушковым.

Практически любой закон природы описывается совокупностью взаимосвязей переменных, составляющих его содержание. При стохастичном характере этих переменных их взаимосвязь, т.е. изменение одной или нескольких из этих переменных, приводящее к систематическому изменению другой или других переменных, может быть оценена с помощью корреляционного анализа. Математическим отображением взаимосвязи двух случайных величин служит коэффициент корреляции (r), позволяющий судить о наличии связи между двумя переменными.

С определенной долей условности значения коэффициента корреляции, изменяющиеся в диапазоне  $-1...+1$ , характеризуют тесноту связи исследуемых переменных: r, лежащий в пределах 0,7...0,99, говорит о сильной статистической взаимосвязи; 0,5...0,69 – средней; 0,2...0,49 – слабой и 0,09...0,19 – очень слабой. Направлен-

ность взаимосвязи характеризует знак  $r$ : плюс – прямая, минус – обратная.

Привлекательная простота корреляционного анализа часто способствует появлению некорректных выводов о наличии причинно-следственной связи между параметрами признаков, тогда как коэффициенты корреляции устанавливают только статистические взаимосвязи. Подобные выводы делаются обычно при малом количестве пар

признаков. Во избежание некорректных выводов необходимо осуществлять проверку значимости коэффициента корреляции. Одним из способов такой проверки является сравнение расчетного значения коэффициента корреляции с табличным (критическим) значением, рассчитанным для определенного количества коррелируемых пар и выбранного уровня значимости  $p$  (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Критические значения коэффициентов корреляции при  $p < 0,05$**   
**Critical values of correlation coefficients for  $p < 0,05$**

Количество коррелируемых пар/ Number of correlated pairs	Критические значения/ Critical meanings	Количество коррелируемых пар/ Number of correlated pairs	Критические значения/ Critical meanings
3	0,977	11	0,602
4	0,950	12	0,576
5	0,878	13	0,553
6	0,811	14	0,532
7	0,754	15	0,514
8	0,707	16	0,497
9	0,666	17	0,482
10	0,632	18	0,468

Сравнение  $r$  и  $r_{\text{крит.}}$  позволяет сделать определенный вывод о нулевой гипотезе: она отвергается, если  $r > r_{\text{крит.}}$ ; при выполнении обратного условия  $r < r_{\text{крит.}}$  нулевая гипотеза принимается. При первом условии коэффициент корреляции считается значимым, а случайные величины коррелированы. При реализации второго условия – коэффициент корреляции незначим, и случайные величины не коррелированы.

В качестве первого объекта исследования определены галениты, синтезированные в Воронежском государственном университете, легированные различными по составу и содержанию примесями [9]. При выборе этого и последующих синтезированных объектов для исследования гипотетически предполагаем, что выявленные закономерности концептуально могут быть распространены и на природные галениты, а также и другие природные сульфиды, т.е. электрофизические параметры и при-

родных сульфидов будут зависеть как от состава, так и от содержания примесей. Это позволяет использовать электрофизические параметры минералов для решения определенного круга прикладных геолого-минералогических задач.

В табл. 2 приведен состав синтезированных галенитов с примесью различного содержания и коэффициенты корреляции, определяющие силу статистической взаимосвязи содержания примеси и электрофизических параметров.

Визуальный анализ коэффициента корреляции, устанавливающего статистическую взаимосвязь количественного содержания примесей в сульфидах с их электрофизическими параметрами (табл. 2) опровергает основную идею, заложенную в нашей монографии [7] об их существенной взаимосвязи. Сопоставление всех рассчитанных значений  $r$  с его критическими значениями говорит о подтверждении нуле-

вой гипотезы, т.е. о некоррелированности анализируемых пар. Однако приведенный пример говорит лишь о некорректном (в

данном случае «валовом») применении корреляционного анализа.

Таблица 2 / Table 2

**Электрофизические параметры образцов галенита, легированных  $Sb_2S_3$  ( $\alpha$  измерен при  $DT=45^\circ C$ ), и коэффициенты корреляции**

**Electro-physical parameters of galena samples doped with  $Sb_2S_3$  ( $\alpha$  measured at  $DT = 45^\circ C$ ), and correlation coefficients**

Номер образца/ Number of a sample	Содержание $Sb_2S_3$ , мол. %/ Content $Sb_2S_3$ , mol. %	Коэффициент термоЭДС $\alpha$ , мкВ/град./ Thermal EMF coefficient $\alpha$ , MV / deg.	Электропроводность $\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup> / Electroconductivity $\sigma$ (Ohm · cm) <sup>-1</sup>	Постоянная Холла $R$ , см <sup>3</sup> /кул./ Hall constant $R$ , Cm <sup>3</sup> /coulomb	Концентрация по измерениям Холла $C_{холл}$ , см <sup>-3</sup> / Concentration according to Hall measurements $C$ hall, cm <sup>-3</sup>
С 29	3,0	-40	$1,31 \cdot 10^3$	0,33	$1,9 \cdot 10^{19}$
С 30	3,12	-61	$1,0 \cdot 10^3$	0,30	$2,0 \cdot 10^{19}$
С 31	3,25	-78	$7,6 \cdot 10^2$	0,18	$3,4 \cdot 10^{19}$
С32	3,5	-160	$3,62 \cdot 10^2$	0,081	$7,7 \cdot 10^{19}$
С33	4,0	-575	$3,8 \cdot 10^3$	0,066	$9,4 \cdot 10^{15}$
С34	5,0	-540	$2,5 \cdot 10^4$	-	-
С35	7,0	-475	-	-	-
Коэффициент корреляции/ Coefficient correlations		<b>-0,711</b>	<b>-0,797</b>	<b>-0,886</b>	<b>-0,146</b>
Критическое значение/ Critical value		<b>0,754</b>	<b>0,811</b>	<b>0,878</b>	<b>0,878</b>

Дальнейший более детальный анализ позволяет установить, что вся серия образцов состоит из двух принципиально различных групп: первая – образцы С29...С32 и вторая – С33...С35. Об этом убедительно свидетельствуют корреляционные поля содержаний в образце  $Sb_2S_3$  и коэффици-

ентов термоЭДС (рис. 1). Для четырех образцов (С29...С32) характерна обычная зависимость коэффициента термоЭДС от концентрации носителей, по которой возрастание концентрации носителей влечет уменьшение величины  $\alpha$  ( $r = -0,98$ ).

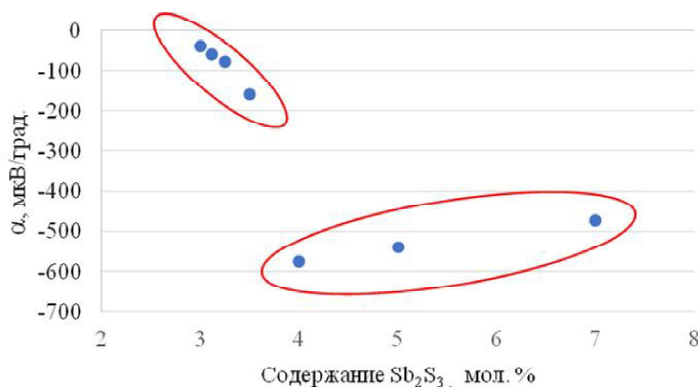


Рис. 1. Корреляционные поля пары «содержание  $Sb_2S_3$  – коэффициент термоЭДС» в образцах синтезированных галенитов

Fig. 1. Correlation fields of the pair « $Sb_2S_3$  content – coefficient thermo-electric power» in samples of synthesized galena

Для других коррелируемых пар образцов первой группы коэффициенты корреляции свидетельствуют также о наличии сильной статистической взаимосвязи: для пар «содержание-электропроводность»  $r = -0,986$ ; «содержание-постоянная Холла»  $r = -0,982$ ; «содержание-концентрация Холла»  $r = -0,959$ .

Корреляционное поле пар «содержание  $Sb_2S_3$  – коэффициент термоЭДС» второй группы образцов (рис. 1) и значение  $r = 0,999$  свидетельствуют о наличии практически линейной прямой зависимости содержания в образце  $Sb_2S_3$  и коэффициента термоЭДС, что относительно направленности связи противоречит теоретическим представлениям физики минералов [3].

Мы не располагаем данными измерений концентрации Холла по всем трем образцам, поэтому делать какие-либо выводы нет достаточных оснований. В качестве

объяснения может быть привлечен тезис о гетерогенности этих образцов. Соображения в пользу этого приведены в нашей работе [7], где показано, что пересчет концентраций примесных носителей в весовые проценты свидетельствует, что из всей введенной при синтезе примеси  $Sb_2S_3$  изоморфно в структуру галенита вошла относительно малая часть сурьмы (0,4 %), остальная часть (2,11 %) обособилась во включениях. Кроме того, сера, входящая в состав примеси, при количествах ее более 4 мол. %, возможно, существенно изменяет режим синтеза.

В табл. 3 приведен состав синтезированных галенитов с примесью  $AgBiS_2$  различного содержания и коэффициенты корреляции, определяющие силу статистической взаимосвязи содержания примеси и электрофизических параметров – коэффициента термоЭДС и электропроводности.

Таблица 3 / Table 3

**Электрофизические параметры образцов галенита, легированных  $AgBiS_2$ , и коэффициенты корреляции ( $\alpha$  измерен при  $DT=45\text{ }^\circ\text{C}$ )**

**Electro-physical parameters of galena samples doped with  $AgBiS_2$ , and correlation coefficients ( $\alpha$  measured at  $DT = 45\text{ }^\circ\text{C}$ )**

Номер образца/ Number of a sample	Содержание $AgBiS_2$ , мол. %/ Content $AgBiS_2$ , mol. %	Коэффициент термоЭДС, мкВ/град./Coefficient of thermoEMF, MV/deg.	Электропроводность $s$ , $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ /Electrical conductivity $s$ $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$
500/9	1,0	-85	$4,1\cdot 10^3$
C11	3,0	-120	$1,8\cdot 10^3$
C12	4,0	-160	$7,5\cdot 10^2$
500/10	5,0	-200	$3,2\cdot 10^2$
C13	6,0	-430	$2,1\cdot 10^1$
C14	10,0	-965	–
C15	15,0	-1025	–
Коэффициент корреляции/Correlation coefficient		<b>-0,947</b>	<b>-0,972</b>
Критическое значение/ Critical value		<b>0,754</b>	0,878

Синтезированные системы  $PbS-AgBiS_2$  по праву можно отнести к категории сложных по составу соединений хотя бы потому, что в этой системе атомы  $Ag$  и  $Bi$  являются атомами замещения и обладают противоположными эффектными зарядами, поэтому в галените  $Ag$  играет акцепторную роль, а  $Bi$  – донорную. Исходя из этого, можно было бы ожидать проявления сложных

эффектов вхождения этих примесей в решетку галенита, что непременно нашло бы отображение в значениях электрических параметров.

Однако установленные корреляционные связи говорят о закономерной и статистически значимой взаимосвязи содержания примеси и электрофизических параметров. Как показывают данные, при-

веденные в табл. 3, при весьма значительном количественном диапазоне содержаний примеси  $AgBiS_2$  (1,0...15,0 мол. %) система  $PbS-AgBiS_2$  адекватно откликается на различные содержания  $AgBiS_2$  гомогенностью состава, о чем свидетельствует монотонное изменение коэффициента термоЭДС.

В табл. 4 приведен состав синтезированных галенитов с примесями  $Bi$  и  $Bi_2S_3$  различных содержаний и коэффициенты корреляции, определяющие силу статистической взаимосвязи состава и электрофизических параметров.

Таблица 4 / Table 4

**Электрические параметры образцов галенита, легированных  $Bi$  и  $Bi_2S_3$  ( $\alpha$  измерено при  $DT=45^\circ C$ )**

**Electrical parameters of galena samples doped with  $Bi$  and  $Bi_2S_3$  ( $\alpha$  measured at  $DT = 45^\circ C$ )**

Номер образца/ Number of a sample	Содержание примеси, мол. %/ Impurities content, Mol. %	Коэффициент термоЭДС $\alpha$ , мкВ/град./ Thermo-EMF coefficient $\alpha$ , MV / deg.	Электропроводность $\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup> / Electroconductivity $\sigma$ (Ohm·cm) <sup>-1</sup>	Постоянная Холла $R$ , см <sup>3</sup> /кул./ Hall constant $R$ , cm <sup>3</sup> /coulomb	Концентрация по измерениям Холла $C_{холл}$ , см <sup>-3</sup> / Concentration according to Hall measurements, $C_{hall}$ , cm <sup>-3</sup>
500/16	Bi – 0,1	-224	$3,9 \cdot 10^1$	5,06	$1,2 \cdot 10^{18}$
500/18	Bi – 1,0	-75	$3,2 \cdot 10^2$	0,84	$7,4 \cdot 10^{18}$
С – 70	Bi – 5,0	-35	$3,9 \cdot 10^2$	0,31	$8 \cdot 10^{18}$
Коэффициент корреляции/ Coefficient correlations		0,78	0,77	-0,71	0,70
Критическое значение/ Critical value		0,977	0,977	0,977	0,977
С – 20	$Bi_2S_3$ – 1,0	-110	$2,9 \cdot 10^2$	-	-
С – 21	$Bi_2S_3$ – 3,0	-65	$6,3 \cdot 10^2$	-	-
С – 22	$Bi_2S_3$ – 5,0	-40	$2,6 \cdot 10^3$	0,49	$1,2 \cdot 10^{19}$
Коэффициент корреляции/ Coefficient correlations		0,98	0,92	-	-
Критическое значение/ Critical value		0,977	0,977	-	-

Согласно данным табл. 4, единственная коррелируемая пара – это содержание введенной при синтезе галенита примеси  $Bi_2S_3$  и коэффициент термоЭДС, однако при этом значимость коэффициента корреляции находится на самом нижнем уровне порога. По аналогии с предыдущими сериями синтезированных галенитов можно предположить, что принципиальных отличий в статистической взаимосвязи содержаний примесей  $Bi$  и  $Bi_2S_3$  и всех измеренных электрофизических параметров быть не должно.

Фактические результаты связаны, во-первых, с минимальным количеством пар, при котором вообще можно рассуждать о корреляционных связях и, во-вторых, возможными погрешностями измерений сложных электрофизических параметров,

которые, по всей вероятности, были бы нивелированы при большем количестве синтезированных образцов.

Природные образцы сульфидов, на которых осуществлялось выявление статистической взаимосвязи состава и электрофизических свойств, представлены пиритом Уконикского золоторудного месторождения (Забайкальский край). В литературе известны немногочисленные работы, касающиеся связи свойств природного пирита с условиями его образования [2; 8].

В табл. 5 приведены электрофизические параметры пиритов Уконикского месторождения, а также результаты химического анализа монофракций пирита на мышьяк. Анализ экспериментальных данных позволил установить [7], что дырочный

тип проводимости пиритов Уконикского месторождения обусловлен акцепторным действием примеси мышьяка, изоморфно замещающим серу в пирите. При таком типе гетеровалентного изоморфизма  $As^{3-}$  замещает  $S^{2-}$  и превращает некоторые гантели  $:S:S:$  в гантели  $:S:As:$ . Примеры подобного изоморфизма приводит, например, Т. Н. Шадлун

с соавторами [11], а также другие исследователи. Вероятность такого замещения в исследованных пиритах подтверждается, во-первых, коррелируемым возрастанием концентрации носителей тока при возрастании содержания мышьяка в образце (табл. 5), во-вторых, нашими температурными исследованиями электропроводности.

Таблица 5 / Table 5

**Концентрации мышьяка в пиритах Уконикского месторождения, электрофизические параметры и коэффициенты корреляции состава и свойств**  
**Concentration of arsenic in the pyrite deposits of the Ukonik deposit, Electro-physical parameters and correlation coefficients of composition and properties**

Номер образца/ Number of a sample	Параметры/ Options				
	Концентрация мышьяка по хим. анализу $C_{As}$ , % / Concentration of arsenic in chemical analysis $C_{As}$ , %	Коэффициент термоЭДС $a_k$ , мкВ/град/ThermoEMF coefficient $a_k$ , MV / deg.	Электропроводность $s_j$ , (Ом·см) <sup>-1</sup> / Electroconductivity $s_j$ , (Ohm · cm) <sup>-1</sup>	Постоянная Холла $R$ , см <sup>3</sup> /кулон/ Hall constant $R$ , cm <sup>3</sup> / coulomb	Концентрация по измерениям Холла $C_{хол.}$ , см <sup>-3</sup> / Concentration according to Hall measurements $C_{hall}$ , cm <sup>-3</sup>
1941	2,06	+290	6,6	0,019	3,2·10 <sup>20</sup>
3438	1,34	+316	4,5	0,021	3,0·10 <sup>20</sup>
1867	1,20	+287	0,74	0,024	2,6·10 <sup>20</sup>
1913	1,24	+330	4,8	0,028	2,2·10 <sup>20</sup>
3425	1,12	+290	1,2	0,032	1,9·10 <sup>20</sup>
3474	1,20	+286	9,2	0,032	1,9·10 <sup>20</sup>
1965	1,05	+339	0,68	0,036	1,8·10 <sup>20</sup>
X	1,09	+330	9,3	0,042	1,5·10 <sup>20</sup>
3467	0,97	+296	1,7	0,042	1,5·10 <sup>20</sup>
3441	0,60	+281	2,7	0,057	1,1·10 <sup>20</sup>
3472-2	0,79	+320	1,0	0,078	8,1·10 <sup>19</sup>
1970	0,79	+340	3,2	0,098	6,4·10 <sup>19</sup>
1861	0,40	+230	1,0	0,13	4,8·10 <sup>19</sup>
3442	0,82	+365	1,8	0,15	4,1·10 <sup>19</sup>
1969	0,67	+315	1,5	0,21	3,0·10 <sup>19</sup>
1953	0,37	+195	3,4	0,21	2,9·10 <sup>19</sup>
1881	0,15	+223	0,16	0,52	1,2·10 <sup>19</sup>
<b>Коэффициент корреляции/ Coefficient correlations</b>		<b>0,457</b>	<b>0,514</b>	<b>-0,714</b>	<b>0,903</b>
<b>Критическое значение/ Critical value</b>	<b>0,482</b>				

Вычисления коэффициентов корреляции состава пиритов и свойств (две нижние строки таблицы) показали, что две пары параметров («концентрация мышьяка – постоянная Холла» и «концентрация мышьяка

– концентрация носителей тока») выявили сильную статистическую взаимосвязь, соответственно – 0,714 и 0,903. Две другие пары («концентрация мышьяка – термоЭДС» и «концентрация мышьяка – элек-

тропроводность») выявили слабую (первая пара) и среднюю (вторая пара) статистические взаимосвязи, причем для первой пары подтверждается нулевая гипотеза, что говорит о коэффициенте корреляции как незначимом, а об исследуемых величинах как не коррелированных.

Построение корреляционного поля для пар «концентрация мышьяка – термоЭДС» позволило установить (рис. 2), что образец 1941 «выбивается» из пространства корреляционного поля и, возможно, он существенно искажает реальную статисти-

ческую взаимосвязь. Исключение этого образца из расчетов показало, что коэффициент корреляции оказался равным 0,632 при его критическом значении 0,497, что говорит о средней статистической взаимосвязи.

Предпринятая попытка разделить весь массив образцов на две группы (рис. 2 – зеленый овал), основанная на предположении о двух различных генерациях пирита, при корреляционном анализе показала существенно худшие результаты, что обязало нас отвергнуть эту гипотезу.

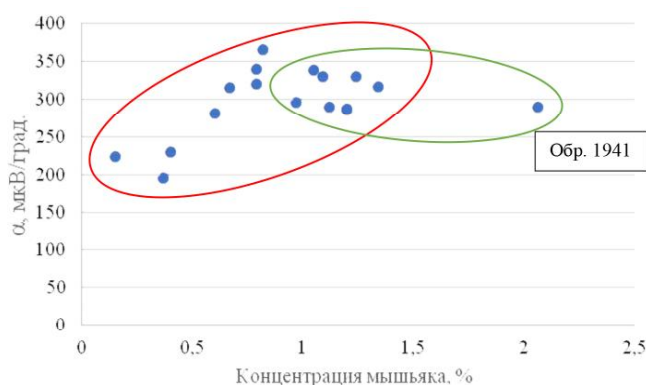


Рис. 2. Корреляционные поля пар «концентрация мышьяка – коэффициент термоЭДС» в образцах природных пиритов

Fig. 2. Correlation fields of pairs «arsenic concentration – coefficient thermo-electric power» in samples of natural pyrites

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать, на наш взгляд, однозначный вывод о достаточно сильной статистической взаимосвязи состава и электрофизических свойств сульфидных минералов.

**Выводы.** Таким образом, практическое использование электрофизических параметров сульфидных минералов для решения определенного круга геолого-минералогических задач

кроме теоретического и экспериментального обоснования получило и статистическое. Это еще раз говорит о взаимосвязи электрофизических параметров с вещественным состав минералов, соотношением в них матричных компонентов, составом изоморфных примесей, детерминируемых основными условиями минералообразующей системы.

### Список литературы

1. Бородаев Ю. С., Мозгова И. Н. Об изоморфном замещении серы в пирите мышьяком и сурьмой // сб. Парагенезисы рудных минералов. М.: Наука, 1974. С. 3–13.
2. Князев Г. И., Куделя В. К. Полупроводниковые свойства галенитов и пиритов как критерий условий рудообразования. Киев: Наукова Думка, 1969. 116 с.
3. Марфуни А. С. Введение в физику минералов. М.: Недра, 1974. 319 с.
4. Мозгова И. Н. Об изоморфизме в сульфидах и их аналогах // сб. Изоморфизм минералов. М.: Наука, 1975. С. 86–113.



5. Ракчев А. Д., Чернышев Л. В. Зависимость энергии активации и химического состава пиритов от условий их синтеза // Докл. АН СССР, Сер. геол., 1968. Т. 183. № 4–6. С. 1184–1187.
6. Романов В. Г. Экспериментальное обоснование зависимости «состав–свойства» на основе исследования электрических свойств синтезированных галенитов // Вестник ЧитГУ. 2009. № 1 (52). С. 80–87.
7. Романов В. Г. Электрофизические методы исследования сульфидных минералов и рудных объектов. Чита: ООО «Техноленд», 2009. 232 с.
8. Суэуки Т. Связь между некоторыми свойствами пирита и их образованием: сб. Онтогенические методы изучения минералов. М.: Наука, 1970. С. 64–89.
9. Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М.: Высшая школа, 1975. 302 с.
10. Фаворов В. А., Красников В. И., Сычугов В. С. Некоторые факторы, определяющие изменчивость полупроводниковых свойств пирита и арсениопирита // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1972. № 11. С. 72–84.
11. Шадлун Т. Н., Тренева Н. В., Велчев В. Мышьяковистые пирит и бравоит из месторождения Седмочисленцы // сб. Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975. С. 113–122.
12. Шуй Р. Т. Полупроводниковые рудные минералы. Л.: Недра, 1979. 287 с.
13. Юргенсон Г. А. Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск: Наука, 2003. 368 с.
14. Fisher M., Hiller L. Ober den thermoelektrische Effest des Pyrites.-Neuse Jahrb. Miner. Abhandl., 1956, Bd 83, no. 3, pp. 291–301.
15. Fleischer M. Minor elements in some sulfide minerals.-Econ Geol., 50-th Anniv, yov. 1905–1955, pt 2, 1955, pp. 970–1024.

## References

1. Borodaev Yu. S., Mozgova I. N. *Ob izomorfnom zameshhenii sery v pirite myshhyakom i surimoy* (On isomorphous substitution of sulfur in pyrite with arsenic and antimony): coll. articles Parageneses of ore minerals. Moscow: Science, 1974. pp. 3–13.
2. Knyazev G. I., Kudel V. K. *Poluprovodnikovye svoystva galenitov i piritov kak kriteriy usloviy rudoobrazovaniya* [Semiconductor properties of galenites and pyrites as a criterion for ore formation conditions]. Kiev: Naukova Dumka, 1969. 116 p.
3. Marfunin A. S. *Vvedenie v fiziku mineralov* [Introduction to the physics of minerals]. Moscow: Nedra, 1974. 319 p.
4. Mozgova N. N. *Ob izomorfizme v sulfidakh i ih analogah* (Isomorphism in sulfides and their analogues): Coll. art. Isomorphism of minerals. Moscow: Science, 1975. P. 86–113.
5. Rakcheyev A. D., Chernyshev L. V. *Dokl. AN SSSR, Ser. geol.* (Reports of Academy Sciences of the USSR, Ser. Geol.), 1968, vol. 183, no. 4–6, pp. 1184–1187.
6. Romanov V. G. *Vestn. Chit. Gos. Univ.* (Bulletin of the Chita State University), 2009, no. 1 (52), pp. 80–87.
7. Romanov V. G. *Elektrofizicheskie metody issledovaniya sulfidnykh mineralov i rudnykh obektov* [Electro-physical methods for studying sulphide minerals and ore objects]. Chita: LLC «Technoland», 2009. 232 p.
8. Sueuki T. *Svyaz mezhdru nekotorymi svoystvami pirita i ih obrazovaniem* (Relationship between certain properties of pyrite and their formation): Coll. art. Ontogenic methods of studying minerals. Moscow: Science, 1970. pp. 64–89.
9. Ugai Ya. A. *Vvedenie v himiyu poluprovodnikov* [Introduction to the chemistry of semiconductors]. Moscow: Higher School, 1975. 302 p.
10. Favorov V. A., Krasnikov V. I., Sychugov B. C. *Izv. AN SSSR, Ser. geol.* (News of the Academy of Sciences of the USSR, Ser. Geol.), 1972, no. 11, pp. 72–84.
11. Shadlun T. N., Treneva N. V., Velchev V. *Myshhyakovistye pirit i bravoit iz mestorozhdeniya Sedmochislenisty* (Arsenic pyrite and bravoite from the Sedmocheslenitsy deposit): coll. art. Isomorphism in minerals. Moscow: Science, 1975, pp. 113–122.
12. Shuy R. T. *Poluprovodnikovye rudnye mineral* [Semiconductor ore mineral]. Leningrad: Nedra, 1979. 287 p.
13. Yurgenson G. A. *Tipomorfizm i rudnye formatsii* [Typomorphism and ore formations]. Novosibirsk: Science, 2003. 368 p.
14. Fisher M., Hiller L. *Ober den thermoelektrische Effest des Pyrites.-Neuse Jahrb. Miner. Abhandl.* (Ober den thermoelektrische Effest des Pyrites.-Neuse Jahrb. Miner. Abhandl.), 1956, Bd 83, no. 3, pp. 291–301.
15. Fleischer M. *Minor elements in some sulfide minerals.-Econ Geol., 50-th Anniv, yov.* (Minor elements in some sulfide minerals.-Econ Geol., 50-th Anniv, yov.), 1905–1955, pt 2, 1955, pp. 970–1024.

**Коротко об авторе**

**Briefly about the author**

**Романов Валерий Григорьевич**, д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры «Социально-правовые дисциплины», Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: методика и аппаратура для измерения электрофизических параметров рудных минералов, практическое использование результатов  
vgromanow@yandex.ru

**Valery Romanov**, doctor of geol.-mineralogical sciences, professor, Social and Legal Disciplines department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: method and apparatus for measuring the electrical parameters of ore minerals, practical use of the results

**Образец цитирования**

*Романов В. Г. Статистическое обоснование зависимости «условия образования – состав – электрофизические свойства» сульфидных материалов // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 4. С. 23–32. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-4-23-32.*

*Romanov V. Statistical substantiation of the dependence «formation conditions – composition – electrophysical properties» of sulphide materials // Transbaikal State University Bulletin, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 23–32. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-4-23-32.*

Дата поступления статьи: 07.04.2017 г.  
Дата опубликования статьи: 28.04.2017 г.

