

УДК 550.42:546:549.2/8

ГЕОХИМИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ СИНЮХИНСКОГО ЗОЛОТО-МЕДНО-СКАРНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ**Гусев А.И.***Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

В статье приведены составы рудных минералов Синюхинского месторождения (пиритов разных генераций, халькопирита, борнита, халькозина, магнетита, галенита). Установлено влияние на концентрации золота различных физических параметров минералов и физико-химической обстановки на период кристаллизации. Помимо золота и меди из руд и концентратов месторождения попутно можно извлекать теллур, висмут, серебро. В минералах проявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ W – и M-типы. Содержания золота в минералах коррелируются с величиной ТЭФ РЗЭ. Соотношение изотопов свинца указывает на различный источник свинца галенитов.

Ключевые слова: рудные минералы, пирит, халькопирит, борнит, халькозин, галенит, физические свойства минералов, физико-химические условия среды, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ

GEOCHEMISTRY OF ORE MINERALS SINIUKHINSKOE GOLD-COPPER-SKARN DEPOSIT MOUNTAIN ALTAI**Gusev A.I.***The Shukshin Altai State Humane-Pedagogical University, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru*

Compositions of ore minerals Siniukhinskoe deposit (pyrites of different generations, chalcopyrite, bornite, chalcocite, magnetite, galena) lead in paper. Influence on concentration of gold different physic parameters of minerals and physic-chemical setting on period of crystallization arrange. Tellurium, bismuth, silver can be extract from ores and concentrate of deoposit incidentally besides of gold and copper. Two types tetradic effect fractionation of REE W- and M-types display in minerals. Contents of gold in minerals correlated with size of tetradic effect fractionation of REE. Ratio of isotopes lead galena show on the different spring of lead in galena.

Keywords: ore minerals, pyrite, chalcopyrite, bornite, chalcocite, magnetite, galena, physic properties of minerals, physic-chemical conditions of environment, tetradic effect fractionation of REE

Синюхинское золото-медно-скарновое месторождение является одним из важнейших эксплуатирующихся объектов Юга Сибири [1]. Геохимия рудных минералов этого месторождения изучена слабо, однако она имеет важное значение для комплексного использования его руд и решения некоторых генетических проблем. В связи с тем, что при переработке руд в качестве одного из продуктов получается сульфидный концентрат, – то изучение геохимии рудных минералов Синюхинского месторождения актуально. Цель исследования – осветить геохимию рудных минералов Синюхинского месторождения с целью комплексного извлечения металлов (помимо золота и меди) и решение некоторых генетических проблем.

Результаты исследования и их обсуждение

Синюхинское золото-медно-скарновое месторождение находится в Чойском районе Республики Алтай. Оно включает золото-медно-скарновое, золото-порфировое, жильное золото-сульфидно-кварцевое и штокверковое прожилково-вкрапленное оруденение [1, 2]. Скарны мультитадий-

ные, на которые наложены многочисленными минеральными агрегатами разного состава. Из рудных минералов отмечаются магнетит, пирит, халькопирит нескольких генераций. Наиболее продуктивная золото-сульфидная минерализация включает борнит, халькозин, халькопирит, пирит II, золото I, II, кварц III, реже биотит. Галенит, сфалерит и арсенопирит встречаются в виде более поздних прожилков, секущих все минеральные агрегаты. В наиболее богатых на золото и медь рудах резко преобладают борнит, халькозин и халькопирит. Спорадически среди поля борнита встречаются редкие включения дигенита размером 0,1-0,2 мм. В ассоциации с борнитом отмечаются мелкие выделения тетрамитита, висмутита, блёклой руды, алтаита (0,05-0,1мм). Особенности самородного золота изучены нами ранее [4]. Распределение и концентрации золота в пиритах разных генераций и сопоставление с другими месторождениями Центрально-Азиатского складчатого пояса также систематизированы [3]. Остановимся на ранее не анализированных данных. Состав рудных минералов, проанализированных в этом исследовании, представлен в табл. 1.

Таблица 1
Микроэлементный состав минералов Синюхинского месторождения (г/т)

Be	3,5	2,16	1,77	2,45	9,75	1,24	1,36	1,19	1,08	2,85
V	12,6	7,64	8,19	11,7	10,7	8,55	12,8	18	8,7	9,7
Rb	2,3	2	2	2,04	2	2	2	2	2	2,5
Sr	3,1	2,97	2,96	5,85	3,67	6,29	27,4	29,6	6,55	3,85
Y	5,5	3,62	4,64	2,48	3,32	3,1	3,19	3,42	3,15	2,98
Zr	12,7	5,98	9,91	6,67	10	6,3	10	12	4,82	3,37
Nb	2,4	1,23	1,1	0,61	0,67	0,58	1,05	1,96	0,52	0,8
Mo	34,8	4,98	2,58	57,5	11,3	5,03	2,51	6,61	3,08	59,3
Ba	10,6	9,04	7,69	57,8	10,9	6,17	4,6	7,23	10,4	57,4
La	1,5	0,59	0,84	0,46	0,56	0,37	2,53	4,66	0,36	0,66
Ce	5,7	1,35	1,67	1,08	1,04	0,69	4,58	7,74	0,81	1,68
Pr	0,12	0,16	0,17	0,15	0,08	0,07	0,64	0,91	0,085	0,18
Nd	0,8	0,53	0,6	0,5	0,42	0,24	2,57	2,9	0,36	2,5
Sm	0,2	0,005	0,17	0,1	0,04	0,085	0,29	0,39	0,005	0,8
Eu	0,08	0,035	0,051	0,033	0,024	0,026	0,78	0,53	0,032	0,023
Gd	0,34	0,098	0,21	0,09	0,062	0,039	0,33	0,43	0,051	0,11
Tb	0,034	0,02	0,047	0,015	0,013	0,012	0,054	0,078	0,013	0,15
Dy	0,4	0,075	0,29	0,082	0,043	0,052	0,33	0,34	0,022	0,85
Ho	0,07	0,019	0,068	0,016	0,015	0,005	0,056	0,091	0,005	0,18
Er	0,33	0,044	0,21	0,04	0,057	0,026	0,16	0,22	0,001	0,08
Tm	0,06	0,0089	0,034	0,012	0,018	0,0066	0,025	0,03	0,005	0,1
Yb	0,3	0,01	0,15	0,029	0,082	0,014	0,14	0,23	0,01	0,24
Lu	0,04	0,01	0,025	0,0091	0,015	0,0057	0,024	0,042	0,0057	0,096
Hf	0,42	0,13	0,32	0,21	0,19	0,18	0,22	0,26	0,11	0,51
Ta	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
W	5,7	1,9	2,17	35,7	5,44	2,42	1,75	3,13	1,5	25,2
Th	0,7	0,4	0,35	0,18	0,26	0,13	0,22	0,25	0,1	0,28
U	0,22	0,12	0,19	0,1	0,3	0,1	0,68	0,49	0,1	0,15
Mn	156	123	50,9	23,7	123	87	345	654	215,6	28,2
Ni	5,7	4,5	3,38	13,2	23,7	3,6	56	51	2,06	9,2
Co	34,8	18,7	21,03	11,5	31,8	1,9	34	41	24,3	10,1
Cu	306	123	268,4	-	98	45	45,8	55,7	-	-
Pb	45	44	34,8	126	6,8	-	3,8	6,9	19,5	116
Zn	121	109	100,9	15,8	4,5	235	76,8	98,6	179,1	12,6
Ag	9,8	10,5	3,97	156	6,9	432	45,8	87,5	95,2	199
Bi	65,7	54,6	52,4	330	12,5	77,9	10,8	13,1	95,08	374
Sn	0,7	0,9	0,69	0,5	0,8	1,0	5,8	2,7	2,06	0,9
As	4078	3978	3930	15,7	12,8	7,9	5,1	3,7	155,6	16,4
Ba	83,5	56	76,6	3,6	4,6	5,2	1,7	2,2	48,8	25
Cd	1,3	1,0	0,6	1,4	0,8	6,7	3,5	6,2	6,7	5,4
Ga	2,6	2,2	1,0	2,7	3,7	6,7	2,6	6,3	2,46	2,9
Ge	3,0	2,5	1,1	1,6	2,2	4,8	0,9	1,7	2,3	4,6
Zr	4,2	5,8	14,5	2,7	3,1	5,8	3,6	2,7	1167,4	7,7
Sb	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	43,8	3,7	2,7	0,5	0,9
Au	10,8	8,4	9,6	457	0,7	18,7	3,6	4,2	3,8	2475
Cr	4,6	3,4	4,1	2,2	5,8	3,4	2,2	2,0	0,7	2,1
Sc	7,8	9,6	2,21	1,6	9,8	3,6	0,5	0,6	1,32	1,4
Te	21	18	32,4	43,8	11,8	22,8	2,6	3,1	44,0	41,4
In	0,5	0,5	0,5	4,5	1,5	5,8	1,3	1,7	6,08	5,5
∑TR	15,47	6,57	9,17	5,1	5,8	4,72	15,7	22,0	4,9	10,6
(La/Yb) _N	3,3	38,9	3,7	10,4	4,56	17,5	12,0	13,4	23,7	1,8
TE _{1,3}	0,95	1,08	1,06	1,11	0,84	1,52	1,01	0,96	1,11	1,69

Примечание. Анализы выполнены в Лаборатории ОИГИМ СО РАН (г. Новосибирск) методом ICP-MS. ∑TR – сумма редкоземельных элементов. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов, как среднее между первой и третьей тетрадами по [8]. Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [7]. Минералы Синюхинского месторождения: 1 – пирит1 колломорфный, 2 – пирит 2 октаэдрический, 3 – пирит 3 пентагон-додекаэдрический, 4 – борнит, 5 – пирротин, 6 – галенит, 7, 8 – магнетит, 9 – халькопирит, 10 – халькозин.

Таблица 2

Некоторые физические и химические характеристики пиритов
Синюхинского месторождения

Параметры	Пирит I	Пирит II	Пирит III пентагон- додекаэдрический	
			ядро	периф. зона
Формы выделений	коллоидный	кубический	ядро	периф. зона
Формула пирита	FeS _{1,98}	FeS _{2,15}	FeS _{2,4}	FeS _{2,11}
Плотность, г/см ³	5,02	5,11	5,12	5,10
Тип проводимости	n	p-n	p	p
Микротвердость, кгс/мм ²	1612	1637	1596	1605
ТЭДС, мкВ/град	-80	-20	+210	+200
Au, г/т	10,81	8,4	9,25	10,64
Структурная рыхлость решетки минерала	8,03	8,1	9,3	8,5
Условный потенциал ионизации	218,1	217,5	216,3	218,0

Примечание. ТЭДС – термоэлектродвижущая сила. Анализы выполнены в Лаборатории Ростовского государственного университета.

Следует указать, что в сульфидах месторождения в повышенных количествах присутствуют теллур, висмут, серебро, золото. Первые три элемента могут стать предметом извлечения из сульфидных концентратов. А золото в сульфидах относится к «упорному» золоту и также может извлекаться по особой технологии из медного концентрата. Обращает на себя внимание очень высокое содержание золота в халькозине. Концентрации теллура в халькопирите и галените превышают фермы [Иванов, 1973]. Сумма редких земель в рудных минералах не высока и не представляет интереса для попутного извлечения. Однако в минералах отмечается сильно контрастная дифференциация редких земель. Отношение $(La/Yb)_N$ варьирует от 1,8 до 38,9, что указывает на различный тип фракционирования лёгких РЗЭ к тяжёлым. По разному проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ, величин которого варьирует от 0,84 до 1,69. При этом значимые величины ТЭФ РЗЭ W- типа отмечены для пирротина (0,84) и M- типа – для борнита, галенита, магнетита, халькозина (от 1,11 до 1,69). Эти данные показывают, что при кристаллизации сульфидов большую роль играл состав гидротермальных растворов и активность различных летучих – воды, хлора, фтора и других.

Важнейшее значение для Синюхинского месторождения имеют особенности концентраций и распределения золота в сульфидах. Золото в сульфидах, вероятно, приурочено к граням кристаллов и микродефектам в кристаллической структуре в виде тонкодисперсной фазы (0,1-10 миллимикрон) [10]. Немаловажную роль

в концентрации золота сульфидами играют кристаллохимические и физические свойства последних. Что касается золота в сульфидах Синюхинского месторождения, то некоторым подтверждением сказанному могут служить данные, полученные нами по распределению золота в разных генерациях пирита (табл. 2). Пирит в целом характеризуется невысокими концентрациями золота. Самые высокие содержания последнего выявляются в коллоидном пирите I, в кристаллохимической формуле которого отмечается небольшой дефицит серы. Этот пирит классифицируется n- типом проводимости и имеет самые низкие значения термоэлектродвижущей силы. В позднем пирите в крупных кристаллах наибольшие концентрации золота приурочены к периферии кристаллов, где наблюдается снижение содержания серы в составе дисульфида железа, понижение структурной рыхлости минерала, значительное снижение термоэлектродвижущей силы и незначительное повышение микротвёрдости в сравнении с ядром кристаллов.

Высокая кислотность среды, благоприятная для осаждения золота подтверждается также и тем, что наиболее высокие концентрации золота зафиксированы нами в халькозине, имеющим высокое значение потенциала ионизации (200,3). Высокие значения этого показателя характеризуют и более высокую кислотность среды по [5].

С точки зрения стехиометрии формулы пирита кубическая генерация (пирит II) слегка обогащена серой, но имеет самую высокую плотность. Пирит III имеет самый высокий дефицит железа и тем самым наиболее низкую плотность, что не-

благоприятно для накопления в нем золота и других тяжелых металлов. Это и подтверждается набором и концентрациями элементов-примесей в разных генерациях пирита. Следует обратить внимание на закономерное изменение термоэлектрических свойств пирита от ранних к поздним генерациям с изменением типа проводимости и величины ТЭДС, которая возрастает от – 80 до + 200-210 мкВ/град. При этом указанные изменения происходят параллельно со снижением кислотности среды минералообразования, что подтверждается снижением величины условного потенциала ионизации пирита от 218,1 для первой генерации и до 216,3 для третьей (табл. 2). Более высокие концентрации Au приурочены к пириту с более высокой кислотностью среды кристаллизации и дефицитом серы в растворах и меньшей плотностью

кристаллической структуры (колломорфный пирит и периферия пентагон-додекаэдрического пирита III генерации).

Соотношение концентраций Au и величины тетрадного эффекта РЗЭ показывает, что увеличение содержания золота коррелируется с величиной ТЭФ РЗЭ (рис. 1).

Анализ изотопов свинцов в 2 пробах галенитов приведен в табл. 3.

Фигуративные точки составов изотопов свинца указывают на нижнекоровый и орогенный источник свинца (рис. 2).

Границы источников: Upper crust – верхней коры, Lower crust – нижней коры, Orogene – орогена, Mantle – мантии по [11]. Номера фигуративных точек отвечают номерам в табл. 3.

Эти данные указывают на разнородный источник свинца галенитов Синюхинского месторождения (рис. 2).

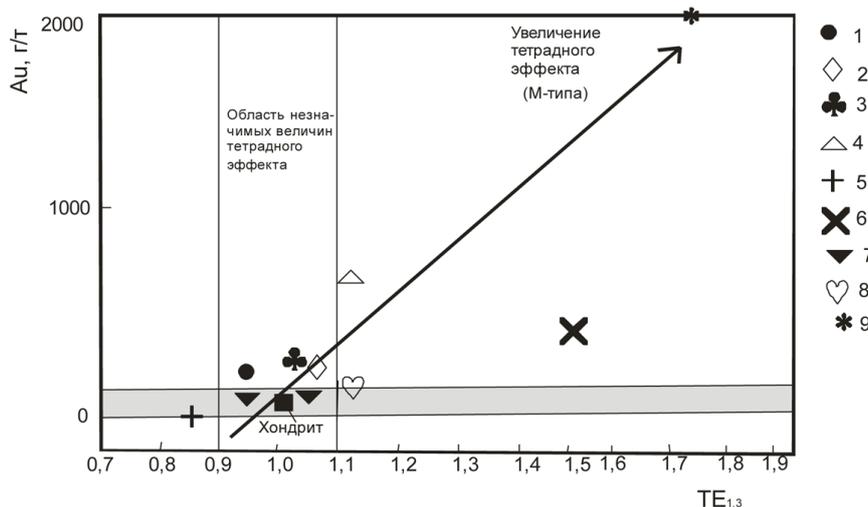


Рис. 1. Соотношение Au – TE_{1,3} для рудных минералов Синюхинского месторождения (составлена автором). Среднее содержание золота в хондритах по [9]. Минералы Синюхинского месторождения: 1 – пирит I колломорфный, 2 – пирит 2 октаэдрический, 3 – пирит 3 пентагон-додекаэдрический, 4 – борнит, 5 – пирротин, 6 – галенит, 7 – магнетит, 8 – халькопирит, 9 – халькозин

Таблица 3

Изотопный состав свинцов галенита Синюхинского месторождения

№ п/п	Месторождения и проявления	Краткая характеристика руд	Изотопный состав свинца				Отношения изотопов	
			²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb
1	Синюхинское (Западно-Файфановский участок)	Кварц-галенит-сфалеритовые прожилки в гранатовых скарнах	1,35	25,01	21,12	52,3	15,64	18,5
2	Синюхинское (Центральный участок)	Кварц-галенитовый прожилок с пиритом и сфалеритом в волластонит-гранатовых скарнах	1,38	24,8	21,11	51,4	15,29	17,97

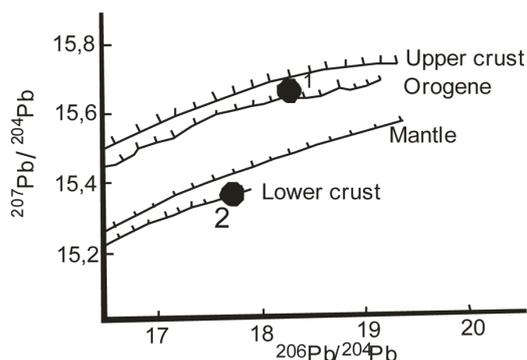


Рис. 2. Свинцовая изотопная эволюция для нижней и верхней коры, мантии и орогена для отношений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для плумботектонической версии в галенитах некоторых участков Синохинского месторождения

Заключение

1. Геохимическое изучение рудных минералов показало, что ряд сульфидных минералов имеют повышенные концентрации теллура, висмута, серебра, золота. При переработке руд из сульфидных и медных концентратов возможно попутное извлечение теллура, серебра, висмута. Из медного концентрата следует дополнительно извлекать «упорное» золото из сульфидов.

2. Золото предпочтительно концентрировалось в сульфидах при повышении кислотности среды в зависимости от физических, термодинамических и физико-химических условий.

3. В сульфидных минералах и магнетите проявлены 2 типа тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ, что вызвано различным составом гидротермальных флюидов, активностью и насыщенностью раз-

личными летучими компонентами (водой, хлором, фтором и другими компонентами). Увеличение величины ТЭФ РЗЭ сопровождается ростом концентраций золота в рудных минералах.

4. Источник свинца галенитов месторождения был разнородным: нижнекоревым и орогенным.

Список литературы

1. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и юга Горной Шории. Автореферат диссертации на соискание уч. степени д-ра г.-м. наук. – Томск, 2006. – 50 с.
2. Гусев А.И. Золото-порфировое оруденение Черёмуховой Сопки Синохинского рудного поля (Горный Алтай) // Современные наукоёмкие технологии, 2013. – № 1. – С. 94–98.
3. Гусев А.И., Пшеничкин А.Я., Табакаева Е.М. О концентрациях золота в пиритах золоторудных месторождений Центрально-Азиатского складчатого пояса // Central Asian Journal of Basic and Applied Research, 2014. – № 1. – С. 5–13.
4. Гусев А.И., Табакаева Е.М. 3D-моделирование состава генераций золота Синохинского месторождения (Горный Алтай) // Вестник Алтайской науки, 2015. – № 1 (23). – С. 246–250.
5. Жариков В.В. Кислотно-основные характеристики минералов // Геология рудных месторождений, 1967. – № 5. – С. 75–89.
6. Иванов В.В. и др. Средние содержания элементов-примесей в минералах. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
7. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
8. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim Cosmochim Acta. – 1999. – V. 63. – № 3/4. – P. 489–508.
9. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1988. – V. 201. – P. 535–544.
10. Wu X., Delbove ., Tongay I.C. Conditions of formation of gold-bearing arsenopyrite: a comparison of synthetic crystals with samples from Le Chatelet gold deposit. Creuse, France Tongay // Mineral Deposita – 1990. – V. 25. – P. 508–512.
11. Zartman R.E., Haines S.M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – a case for bidirectional transport // Geochim. Cosmochim Acta, 1988. – V. 52. – P. 1327–1339.