

УДК 550.42:546:549.2/.8

**ГЕОХИМИЯ АКЦЕССОРНОГО ПИРИТА ЛАМПРОФИРОВ  
ЧОЙСКОГО СКАРНОВОГО ЗОЛОТО-ТЕЛЛУРИДНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ****Гусев А.И., Табакаева Е.М.***Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,  
Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

В статье приведены данные по содержаниям и особенностям распределения большого спектра химических элементов в акцессорных пиритах лампрофиров Чойского месторождения. Пирит представлен кубическими и комбинированными формами куба и октаэдра. Наибольшие концентрации золота и теллура в пиритах свойственны комбинированным формам керсантитов. В пиритах проявлены высокие значения тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- типа, коррелируемые с высокими концентрациями золота. Перенос золота осуществлялся хлоридными соединениями. Процессы кристаллизации пиритов протекали в условиях не подчинения заряд-радиус-контролируемого поведения элементов.

**Ключевые слова:** геохимия, пирит, лампрофиты, химические элементы, тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов, золото, теллур

**GEOCHEMISTRY OF ACCESSORY PYRITES LAMPROPHYRES CHOYSKOE  
SKARN GOLD-TELLURIDE DEPOSIT OF MOUNTAIN ALTAI****Gusev A.I., Tabakaeva E.M.***The Shukshin Altai State Humane-Pedagogical University, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru*

Data on content and peculiarities distribution large spectrum of chemical elements in accessory pyrite lamprophyres Choyskoe deposit lead in paper. Pyrite is cubic and combine forms of cubic and octahedral. More content of gold and tellurium in pyrites peculiar to combine forms of kersantites. High values of tetrad effect fractionation REE M-type display in pyrites that it correlating with high concentrations of gold. Transfer of gold realized by chloride chemical connections. Process of crystallization pyrites passed in conditions non- chard-radius control of behavior of elements.

**Keywords:** geochemistry, pyrite, lamprophyres, tetrad effect fractionation of rare earth elements, gold, tellurium

Оруденение Чойского месторождения связывается различными исследователями с разными интрузивными породами. Большинство исследователей предполагают такую связь с гранитоидами синюхинского комплекса предположительно ранне-девонского возраста, по аналогии с золото-медно-скарновым Синюхинским месторождением. Однако Чойское месторождение имеет значительные отличия от Синюхинского. В нём практически отсутствуют сульфиды, которые в рудах Синюхинского месторождения составляют от 10 до 15 % по объёму. В рудах Чойского месторождения присутствуют теллуриды (тетрадимит, алтаит и другие), которые по объёму не превышают 1-2%. Эти отличия позволяют усомниться в связи оруденения Чойского месторождения с гранитоидами синюхинского комплекса. В пределах Чойского рудного поля, помимо гранитоидов синюхинского комплекса, присутствуют дайки лампрофиров, по составу похожих на лампрофиты чойского комплекса ранне-юрского возраста, проявленных на юге Горного Алтая.

Одним из наиболее распространённых акцессорных минералов изверженных по-

род является пирит. Его геохимические особенности позволяют решать проблемы связи различных типов оруденения и магматизма. С лампрофитами многие исследователи связывают различные типы оруденения золота [10, 13, 15]. Экспериментально установлено, что золото предпочтительней концентрируется в более восстановленных расплавах [9]. Ранее нами показано, что Чойская магмо-рудно-метасоматическая система и относится к восстановленным объектам, а в контактах даек локализованы зоны скарнирования с золотом, что указывает на парагенетическую связь лампрофиров и золотого оруденения в Чойском рудном поле. *Цель исследования* – изучить геохимические особенности и концентрации золота в акцессорном пирите даек лампрофиров, которые могут пролить свет на связь лампрофировой магмы и золотого оруденения.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Чойское месторождение находится в Республике Алтай на небольшом хребтике в междуречье Бия – Ишпа. В пределах Чойского рудного поля широким распро-

странением пользуются лампрофировые дайки, представленные спессартитами, единитами, керсантитами, вогезитами, минеттами (близкими к проверситам), тесно ассоциирующими с долеритами, относящимися предположительно к чуйскому комплексу. Лампрофиры чуйского комплекса в пределах Чойского рудного поля образуют компактный рой даек меридиональной ориентировки, контролируемые Меридиональным разломом. На поверхности известны лишь единичные выходы спессартитов и керсантитов. Значительная часть

лампрофиров распространена на глубине (60-190 м) и вскрыта серией поисковых скважин. Мощности даек варьируют от 0,5 до 10 м, протяжённости отдельных тел составляют первые десятки метров.

Вот всех разностях лампрофиров присутствует в качестве аксессуория пирит, который образует кубические и комбинированные формы куба и октаэдра. При этом пирит комбинированных форм куба и октаэдра отмечаются в керсантитах. Микроэлементный состав пиритов приведен в табл. 1.

Микроэлементный состав аксессуарных пиритов лампрофиров Чойского месторождения (Au- в мг/т, все остальные элементы – в г/т)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Be	3,3	2,6	1,5	1,45	5,75	1,21	1,32	1,9	1,8	2,8
V	12,2	7,6	8,9	11,1	9,7	8,5	12,0	188	8,7	9,2
Rb	2,3	2,1	2,0	2,4	2,2	2,1	2,0	2,2	2,3	2,5
Sr	3,0	2,9	2,6	5,8	3,6	5,9	17,4	19,6	6,5	3,8
Y	5,7	5,62	4,6	3,48	3,3	3,7	3,9	3,4	3,5	2,8
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	5,5	11,3	5,03	2,51	6,61	3,08	9,3
Ba	10,6	9,04	7,69	57,8	10,9	6,17	4,6	7,23	10,4	7,4
La	1,5	0,59	0,84	0,46	0,56	0,37	2,53	4,66	0,36	0,66
Ce	15,7	16,35	19,67	21,08	21,04	20,69	14,58	17,74	10,81	12,68
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	0,34	0,22	0,47	0,15	0,13	0,12	0,54	0,78	0,13	0,17
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	123	98	45	45,8	55,7	55	65
Pb	45	44	34,8	126	6,8	76	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

Окончание таблицы										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sn	0,7	0,9	0,69	0,5	0,8	1,0	5,8	2,7	2,06	0,9
As	407	397	393	215,7	312,8	837,9	225,1	223,7	155,6	216,4
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	11,4	7,7
Sb	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	43,8	3,7	2,7	0,5	0,9
Au	18,2	43,5	40,5	81,4	28,5	95,7	30,4	22,1	42,4	25,8
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	48,8	11,8	52,8	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
ΣTR	25,98	23,77	27,56	26,23	25,89	25,45	26,89	32,69	15,38	21,47
(La/Yb) <sub>N</sub>	3,3	38,9	3,7	10,4	4,56	17,46	11,98	13,44	23,75	1,81
Eu/Eu*	0,94	2,4	0,84	1,07	1,5	1,2	7,8	3,99	3,38	0,14
TE <sub>1,3</sub>	2,1	3,6	3,5	4,1	3,2	5,9	2,5	2,2	3,7	2,3
Y/Ho	81,4	295,8	67,6	217,5	220	740	69,6	37,4	700	15,6
Zr/Hf	30,2	46,0	31,0	31,8	52,6	35,0	45,4	46,2	43,8	6,6

Примечание. Анализы выполнены в Лаборатории ОИГиМСО РАН (г. Новосибирск) методом ICP-MS. ΣTR – сумма редкоземельных элементов. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов, как среднее между первой и третьей тетрадами по [8]. Eu\* = (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>)/2. Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [5]. Акцессорный пирит: 1-3 спессартитов, 4-6 – керсантитов, 6-8 – минетт, 9-10 – вогезитов.

Дисульфид железа включает в себя большой комплекс элементов, большинство из которых присутствуют в небольших концентрациях. Характерны сильные вариации содержаний отдельных элементов (V, Mo, W, Ba, Mn, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, As, Ag, Zr, In). Отмечаются повышенные содержания теллура, которые в пиритах керсантитов и вогезитов лампрофиров Чойского рудного поля превышают ферсмы для пирита по [2]. Сумма редкоземельных элементов в пиритах невысокая и варьирует от 15,38 до 32,69. Соотношение нормированных значений лантана и иттербия весьма изменчиво и колеблется от 1,81 до 38,9, указывая на различную степень дифференциации редкоземельных элементов в дисульфиде железа. Отношение Eu/Eu\* также сильно варьирует в пиритах от 0,14 до 7,8. Максимального значения это отношение достигает в пиритах минетт. Характерной чертой составов редкоземельных элементов пиритов является проявление тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М- типа, колеблющегося от 2,1 до 5,9 и в целом имеющего очень высокие значения. Максимальной величины он достигает в пиритах керсантитов.

Известно, что проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- типа

эффект обнаруживается чаще всего на заключительных стадиях дифференциации гранитных систем. При этом отмечается присутствие в магматитах флюидной фазы, содержащей H<sub>2</sub>O, F, Cl, B, P, CO<sub>2</sub> во время существования жидкой магмы или непосредственно после её кристаллизации [7, 11]. В присутствии ионов фтора и хлора происходят реакции обмена между ними и аква-комплексами, при этом в результате замещения молекулы воды в аква-комплексе ионом галогена могут образоваться комплексные ионы вида {Ln(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>(F, Cl)<sub>y</sub>}<sup>(3-y)+</sup> [3]. В нашем случае мы имеем с лампрофировой магмой и, вероятно, особенности проявления ТЭФ РЗЭ М- типа обусловлены теми же причинами – обогащённость расплавов флюидной фазой с обильными летучими компонентами, из которых главную роль играли H<sub>2</sub>O, F, Cl, B, HS<sup>-</sup>, P, CO<sub>2</sub>. Логично возникает вопрос связи содержаний золота и величины ТЭФ РЗЭ М- типа в акцессорном пирите.

На диаграмме соотношений концентраций золота в пиритах лампрофиров и величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- типа разброс фигуративных точек выстраивается в тренд позитивной корреляции (рис. 1).

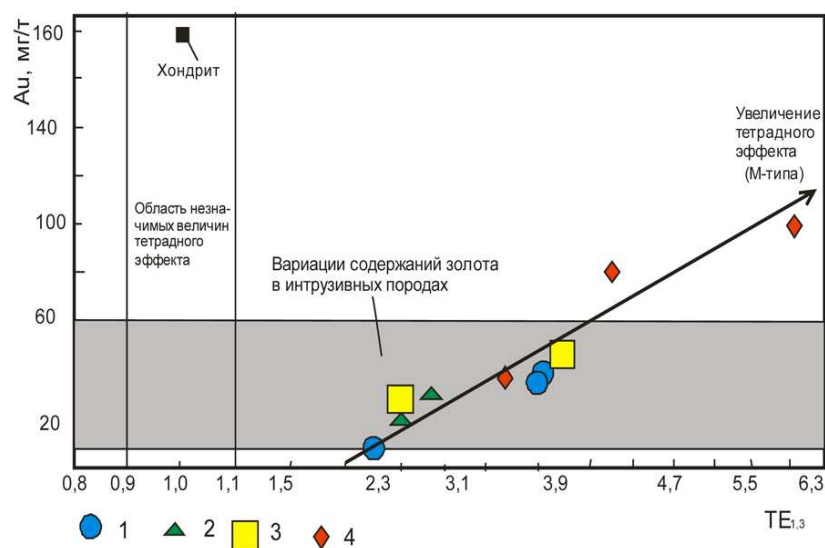


Рис. 1. Соотношение  $Au - TE_{1,3}$  для пиритов лампрофиров Чойского месторождения (составлена А.И. Гусевым)

Среднее содержание золота в хондритах по [14]. Концентрации золота в интрузивных породах по [1]. Пирит лампрофиров Чойского месторождения: 1 – спессартитов, 2 – минетт, 3 – вогезитов, 4 – керсантитов.

Диаграмма показывает, что золото явно мантийный элемент и во всех разностях пиритов лампрофиров оно концентрируется в количествах преимущественно, характерных для интрузивных пород и только в пиритах керсантитов превышает содержания в интрузивных породах, но значительно ниже, чем в хондритах. Позитивная корреляция содержания золота и величины ТЭФ РЗЭ указывает на обилие расплавов летучими компонентами, переносившим золото в растворах с образованием промышленных залежей. В силу дефицита серы в расплаве, основная масса золота переходит в гидротермальные растворы после полной кристаллизации пород. Экспериментальные данные и теоретические расчёты показывают, что при температурах свыше  $500^{\circ}\text{C}$  золото переносится только хлоридными растворами, так как  $\text{H}_2\text{S}$  при таких температурах находится в недиссоциированном состоянии и не даёт устойчивых соединений с золотом [4]. Следовательно, можно предположить, что перенос золота из глубинного очага, дериватами которого были лампрофиры, осуществлялся хлоридными растворами.

Чутким индикатором состояния и поведения химических элементов являются отношения  $Y/No$  и  $Zr/Hf$  в породах и минералах. На диаграмме этих соотношений для пиритов лампрофиров отчётливо видно, что

поведение указанных элементов не подчиняется заряд-радиус-контролируемому поведению химических элементов (рис. 2).

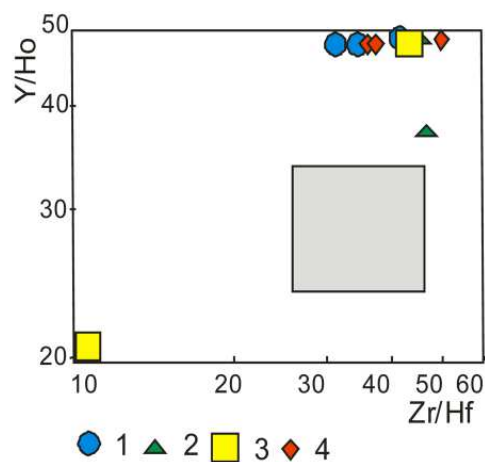


Рис. 2. Диаграмма соотношений  $Zr/Hf - Y/No$  по [6] для пиритов лампрофиров Чойского месторождения

Серым фоном на рисунке показано поле HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) по [6]. Остальные условные на рис. 1.

Соотношение  $Y/No - Zr/Hf$  показывает, что все анализы демонстрируют поведение типа «Non-HARAC» (CHARGE – and – RADIUS-CONTROLLED) [6], когда элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары  $Y-No$  и  $Zr-Hf$ ) экстремально не когерентны и не остаются вблизи хондритовых отношений.

Известно, что CHARAC поведение относится к элементам со сходными и близкими зарядами и радиусами, которые определяют когерентное поведение и имеют постоянные хондритовые отношения и сглаженные хондрит-нормализованные модели редкоземельных элементов относительно ионного радиуса и атомного числа [6]. Non-CHARAC поведение элементов встречается, главным образом, в высокоэволюционированных магматических системах, которые обогащены  $H_2O$ ,  $CO_2$  и летучими компонентами, такими как Li, B, F и / или Cl в течение перехода от силикатного расплава к водным флюидам, или от магматической к гидротермальной системам [12]. Non-CHARAC поведение химических элементов часто сопровождается лантанидным тетрадным эффектом фракционирования РЗЭ, результативно в кривых, сегментированных моделей РЗЭ одновременно в породах и слагающих их минералах. Обе эти особенности отражаются и в акцессорных пиритах из лампрофиров Чойского месторождения.

### Выводы

1. Для пиритов лампрофиров Чойского месторождения характерны повышенные концентрации теллура и золота. Максимумы свойственны пиритам керсантитов, имеющим сложные комбинированные формы куба и октаэдра.

2. В них проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М- типа в очень высоких значениях от 2,1 до 5,9 (особенно высокие значения характерны для пиритов керсантитов).

3. Наблюдается увеличение концентраций золота в пиритах с повышением величин ТЭФ РЗЭ М- типа, обусловленное обилием флюидов с высокими содержаниями и активностями летучих компонентов. Перенос золота осуществлялся при высоких температурах хлоридными соединениями.

### Список литературы

1. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // *Геохимия*, 1962. – № 7. – С. 555–572.
2. Иванов В.В. и др. Средние содержания элементов-примесей в минералах. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
3. Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Современная неорганическая химия. Общая теория. – М.: Мир, 1969. – 224 с.
4. Рябчиков И.Д. Физико-химический анализ условий отделения рудоносных растворов из гранитных магм. Источники рудного вещества эндогенных месторождений. – М., 1974. – С. 30–33.
5. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
6. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // *Contrib. Miner. Petrol.* 1996. – V. 123. – P. 323–333.
7. Bühn B., Trumbull R.B. Comparison of petrogenetic signatures between mantle-derived alkali silicate intrusives with and without associated carbonatite. Namibia // *Lithos*, 2003. – V. 66. – P. 201–221.
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. Jago S., Pichavant M. Gold solubility in arc magmas: Experimental determination of the effect of sulfur at 1000 °C and 0.4 GPa // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2012. – V. 84. – P. 658–670.
10. Porter E.W., Ripley E. Petrologic and stable isotope study of the gold-bearing breccia pipe at the Golden Sunlight deposit, Montana // *Econ. Geol.*, 1985. – V. 80. – P. 1689–1706.
11. Takahashi Y., Yoshida H., Sato N., Hama K., Yusa Y., Shimizu H. W- and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit. Central Japan // *Chem. Geol.*, 2002. – V. 184. – P. 311–335.
12. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic-hydrothermal transition: a summary of experimental studies // *Chem Geol.*, 2004. – V. 210. – P. 7–31.
13. Wang X., Wang T., Jahn B.M., Hu N., Chen W. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains (China) // *Geol. Mag.*, 2007. – V. 144. – № 5. – P. 837–848.
14. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, 1988. – V. 201. – P. 535–544.
15. Wyman D., Kerrich R. Archean shoshonitic lamprophyres associated with Superior Province gold deposits: Distribution, tectonic setting, noble metal abundance, and significance for the gold mineralization // *Econ. Geology Monograph* 6, 1989. – P. 651–667.