

Оценка перспективности магматических пород на порфировое Cu-Mo-Au оруденение по составу биотита на примере шахтаминского интрузивного комплекса, Восточное Забайкалье

(научный руководитель – к.г.-м.н. П.А. Неволько)

V.S. Vesnin
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy UB RAS, Novosibirsk, Russia

Evaluation of potential of igneous rocks for porphyry Cu-Mo-Au mineralization based on the composition of biotite: example of the Shakhtama intrusive complex, Eastern Transbaikalia

Abstract. Biotite of igneous rocks of the Shakhtama complex (Eastern Transbaikalia) has a similar chemical composition. Biotite of fertile rocks has a high MgO content. The IV(F) and IV(Cl) diagram is unsuitable for the discrimination of biotite of fertile and barren rocks of the Shakhtama complex.

Мо-порфировое Шахтаминское и Cu-Au-Fe скарново-порфировое Быстринское месторождения генетически связаны с магматическими породами шахтаминского комплекса. Вмещающими породами для гранитоидов Шахтаминского массива одноименного месторождения выступают пермские гранодиориты ундинского комплекса (SHP) и терригенные отложения нижней юры. Порфировидные граниты ранней фазы шахтаминского комплекса (породы рамы, SEP) прорваны серией более мелких штокоподобных тел порфировидных гранитов (SLP1-2) и гранодиорит-порфиров третьей фазы (SLP3-5). Площадь Быстринского месторождения сложена терригенно-карбонатными отложениями раннекембрийского, среднедевонского и средне-мезозойского возраста. Осадочные породы прорываются магматическими породами шахтаминского комплекса, в которых выделяется Быстринский массив – ранняя фаза, представленная монцонитами (BEP), прорвана более мелкими штоками монцонит-порфиров (BLP1), а также гранит-порфиров и гранодиорит-порфиров поздней фазы (BLP2-5).

Для выявления ореолов распространения промышленной минерализации в пределах пород шахтаминского комплекса могут быть использованы минералы-индикаторы в магматических породах. Наиболее популярными минералами являются циркон и апатит. Изучению биотита посвящено меньше работ, при этом биотит устойчив в широком диапазоне давлений и температур [Yavuz, 2003], а его состав зависит от валового состава родительского расплава [Nash, Crecraft, 1985]. Некоторые исследователи пытались использовать химический состав биотита, чтобы отличить потенциально рудоносные граниты от безрудных [Zhang et al., 2001; Rasmussen, Mortensen, 2013; Azadbakht et al., 2020].

На основе валового состава пород и особенностей состава циркона, к рудоносным на Быстринском месторождении отнесены штоки гранодиорит-порфиров поздней фазы (BLP2-5), в то время как на Шахтаминском месторождении – один шток гранодиорит-порфиров (SLP4) [Nevolko et al., 2021]. Данное исследование акцентирует внимание на особенностях состава биотита из пород связанных с Мо-порфировой и Cu-Au-порфировой минерализацией. Главной задачей является проверка критериев разделения рудоносных и безрудных пород по составу магматического биотита.

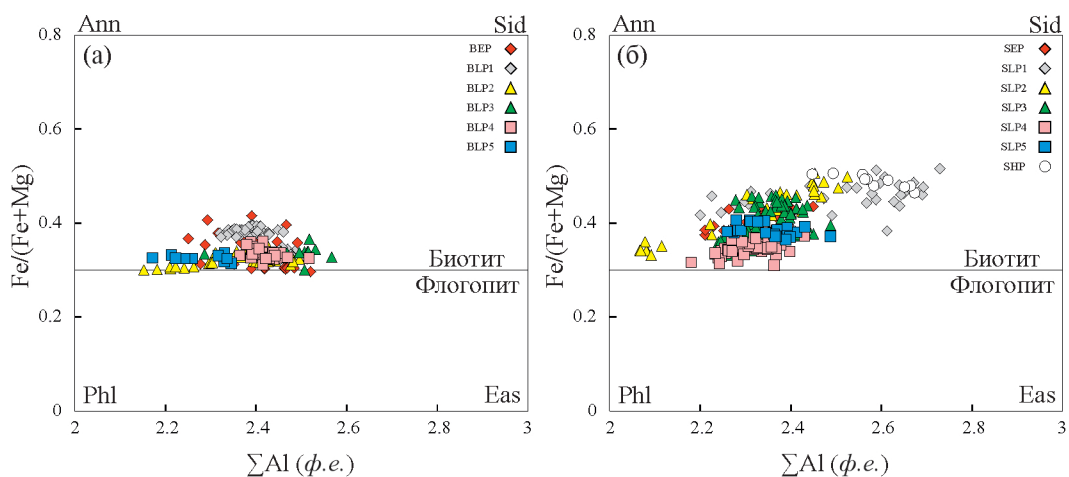


Рис. 1. Классификация биотита Быстринского (а) и Шахтаминского (б) месторождений на диаграмме $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg^{2+}) - \Sigma Al$ (ф. е.) [Rieder et al., 1998].

Ann – аннит, Sid – сидерофиллит, Phl – флогопит, Eas – истонит. BEP – монцониты ранней фазы шахтаминского комплекса Быстринского месторождения; BLP – поздняя фаза шахтаминского комплекса Быстринского месторождения (BLP1 – монцонит-порфиры, BLP2-5 – гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры); SHP – вмещающие гранодиориты ундинского комплекса Шахтаминского месторождения; SEP – порфириновые граниты ранней фазы шахтаминского комплекса одноименного месторождения; SLP – поздняя фаза шахтаминского комплекса одноименного месторождения (SLP1-2 – порфириновые граниты, SLP3-5 – гранодиорит-порфиры). Цифры обозначают номера штоков, например, BLP1 – первый шток поздней фазы шахтаминского комплекса Быстринского месторождения.

Изучены образцы магматических пород, отобранных из массивов и мелких штоков в районе Шахтаминского и Быстринского месторождений, предоставленные научным руководителем, и штучные пробы, отобранные автором в рамках производственной практики в 2021 г. Биотит отобран из 36 проб ранних и поздних фаз шахтаминского и вмещающего ундинского комплекса, проявленных на обоих месторождениях. Образцы дробились на щековой дробилке в несколько этапов. После расситовки зерна биотита отбирались вручную и монтировались в эпоксидные шашки с последующей полировкой до вскрытия минерала. Зерна анализировались по схеме край-центр-край. Химический состав определен в Центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) на микрозондовом анализаторе JEOL JXA 8230 (Jeol, Япония) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 40–70 нА, диаметре пучка электронного зонда 2 мкм, времени считывания 20 с для пиков и 10 с для фона. Используются следующие стандарты: альбит (Si, Na), пироп O-145 (Al, Fe, Mg), ортоклаз 359-1 (K), хромит УВ-126 (Cr), ильменит ГФ-55 (Ti), F-флогопит (F), Cl-апатит (Cl), IGEM_3 (Mn), голубой диопсид (Ca).

В изученных породах биотит не характеризуется вторичными изменениями. Согласно классификации Международной минералогической ассоциации [Rieder et al., 1998], минерал представлен промежуточными членами серии аннит-сидерофиллит (рис. 1). Химический состав биотита представлен в таблице. Несмотря на значительные перекрытия в содержаниях большинства компонентов, выделяются некоторые особенности. Так, для Шахтаминского месторождения наибольшие содержания MgO зафиксированы в биотите рудоносного штока гранодиорит-порфиров поздней фазы SLP4 (15.99 ± 0.63 мас. %). Биотит из безрудных пород характеризуется более низкими средними содержаниями MgO со значительным перекрытием (13.74 ± 0.86 , 11.52 ± 0.89 , 13.21 ± 1.77 , 14.24 ± 1.21 и 14.7 ± 0.37 мас. % для SEP, SLP1,

Химический состав биотита Шахтаминского и Быстринского месторождений (мас. %)

Шахтаминское месторождение														
n	SHP		SEP		SLP1		SLP2		SLP3		SLP4		SLP5	
	10		20		30		30		80		40		30	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
SiO ₂	36.73	0.34	38.02	0.82	39.01	0.83	38.82	1.14	38.23	0.48	38.40	0.56	38.18	0.35
Al ₂ O ₃	14,34	0.42	13.06	0.38	14.10	0.92	13.12	0.78	13.35	0.33	13.18	0.30	13.36	0.30
TiO ₂	3,33	0.56	3.84	0.26	2.79	0.36	2.99	0.42	3.64	0.53	3.40	0.20	3.51	0.15
FeO	19,84	0.51	16.90	0.49	17.37	0.79	17.29	1.62	16.57	1.16	15.01	0.62	16.29	0.48
MgO	11,63	0.52	13.74	0.86	11.52	0.89	13.21	1.77	14.24	1.21	15.99	0.63	14.70	0.37
Cr ₂ O ₃	0,07	0.03	0.15	0.12	0.05	0.03	0.08	0.07	0.16	0.13	0.16	0.09	0.16	0.11
MnO	0,54	0.03	0.24	0.04	0.72	0.35	0.59	0.28	0.16	0.09	0.13	0.04	0.17	0.04
CaO	0,01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05
Na ₂ O	0,12	0.05	0.16	0.06	0.25	0.08	0.24	0.10	0.13	0.04	0.16	0.05	0.23	0.07
K ₂ O	8,82	0.47	9.53	0.16	9.56	0.20	9.66	0.17	9.33	0.25	9.47	0.35	9.00	0.58
F	0,76	0.11	1.16	0.39	3.14	0.68	3.13	0.43	0.87	0.17	1.24	0.13	0.70	0.09
Cl	0,19	0.05	0.25	0.06	0.21	0.04	0.19	0.03	0.18	0.05	0.18	0.03	0.14	0.03
Σ	96,36	0.87	97.07	1.36	98.71	1.30	99.32	1.34	96.86	0.87	97.34	1.01	96.46	1.01

Быстринское месторождение												
n	BEP		BLP1		BLP2		BLP3		BLP4		BLP5	
	30		50		50		10		30		10	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
SiO ₂	38.11	0.84	38.17	0.37	38.97	0.73	38.22	0.58	38.60	0.33	39.78	0.47
Al ₂ O ₃	13.86	0.59	13.62	0.36	13.66	0.46	14.20	0.48	13.89	0.21	13.28	0.41
TiO ₂	5.44	0.40	3.23	0.31	2.82	0.17	2.97	0.14	2.99	0.15	3.55	0.12
FeO	13.84	1.11	15.73	0.79	14.00	0.44	14.33	0.51	14.41	0.46	14.23	0.24
MgO	15.12	1.35	14.85	0.76	16.27	0.54	15.90	0.72	16.07	0.44	16.54	0.51
Cr ₂ O ₃	0.30	0.08	0.12	0.05	0.31	0.06	0.14	0.05	0.33	0.08	0.17	0.04
MnO	0.10	0.03	0.12	0.05	0.09	0.03	0.09	0.03	0.11	0.02	0.10	0.02
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01
Na ₂ O	0.16	0.09	0.12	0.04	0.13	0.05	0.12	0.03	0.12	0.04	0.09	0.02
K ₂ O	9.15	0.31	9.51	0.15	9.09	0.27	8.95	0.29	9.26	0.27	9.24	0.44
F	0.33	0.08	0.89	0.08	0.46	0.12	0.42	0.05	0.41	0.08	1.32	0.10
Cl	0.28	0.10	0.16	0.03	0.20	0.04	0.32	0.05	0.15	0.03	0.17	0.01
Σ	96.69	1.93	96.52	0.81	96.00	0.85	95.65	1.16	96.34	0.62	98.48	1.26

Примечание. \bar{x} – выборочное среднее, σ – среднеквадратичное отклонение выборки. Полу жирным шрифтом выделены рудоносные штоки.

SLP2, SLP3 и SLP5, соответственно). Минимальное содержание MgO установлено в биотите из вмещающих амфибол-биотитовых гранодиоритов ундинского комплекса (SHP 11.63 ± 0.52 мас. %). Для порфировидных гранитов SLP1-2 отмечаются наибольшие содержания F и MnO среди всех изученных пород.

В биотите рудоносных штоков Быстринского месторождения (BLP2-5) содержания MgO выше, чем в биотите безрудного штока BLP1. Для биотита монзонит-порфиров ранней фазы (BEP) характерны повышенные содержания TiO₂ и Cl (0.6 ± 0.04 и 0.28 ± 0.1 мас. %, соответственно) и наименьшие содержания F (0.33 ± 0.08 мас. %) с подобными содержаниями

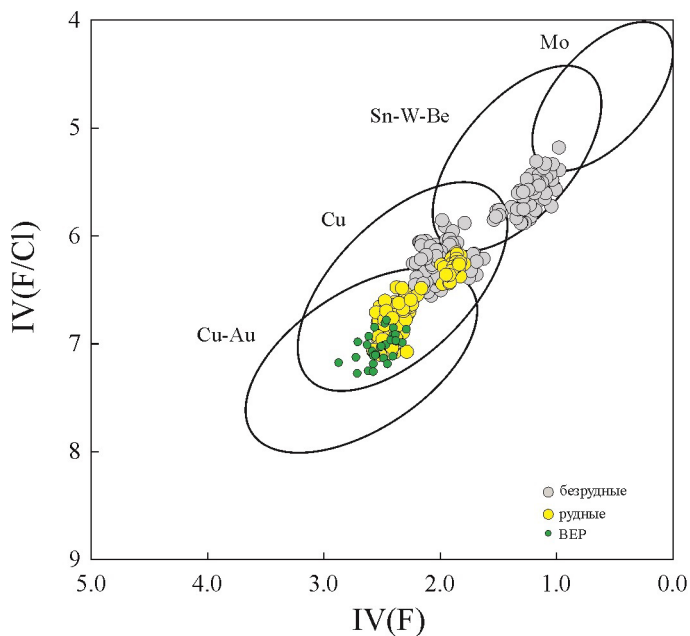


Рис. 2. Коэффициенты захвата IV(F)–IV(F/Cl) в биотите Шахтаминского и Быстринского месторождений, отражающие содержание галогенов в биотите.

Поля Cu, Sn-W-Be и Mo-порфиров приведены согласно [Munoz, 1984].

ями MgO в биотите рудоносных штоков (BLP2-5). Повышенное содержание Cl отмечено в биотите гранодиорит-порфиров поздней фазы BLP3 (0.32 ± 0.5 мас. %). Содержание F – наибольшее в биотите гранодиорит-порфиров BLP1 и BLP5 (0.89 ± 0.08 и 1.32 ± 0.1 мас. %, соответственно).

Для оценки степени активности галогенов могут быть использованы независимые от температуры и давления коэффициенты захвата F (IV(F)), Cl (IV(Cl)) и их отношения (IV(F/Cl)) в слюдах разного состава [Munoz, 1984]. Коэффициенты захвата IV(F), IV(Cl) и IV(F/Cl) для биотита рассчитаны по уравнениям из работы [Munoz, 1984]. Более низкие коэффициенты захвата IV(F) биотита коррелируют с более высоким обогащением F во флюиде, а более низкие коэффициенты захвата IV(Cl) биотита соответствуют более высокому обогащению Cl во флюиде. Например, высокие значения IV(F) наблюдаются в богатом Mg биотите из порфирового Cu-Mo месторождения Хафтчешмен [Sallet, 2000]. На дискриминационной диаграмме IV(F)–IV(F/Cl) точки состава биотита Шахтаминского и Быстринского месторождений из рудоносных штоков и безрудных пород попадают в поле Cu и Cu-Au порфиров (рис. 2). Часть точек из образцов, не связанных с оруденением, попадает в поле Sn-W-Be порфиров. Биотит рудных штоков характеризуется низкими значениями IV(F) и IV(F/Cl), что говорит об обогащении F и Cl флюидной фазы.

Таким образом, биотит из пород, с которыми связано порфировое оруденение, характеризуется более высокими содержаниями MgO в отличие от биотита из безрудных пород. Диаграмма, основанная на коэффициентах захвата IV(F) и IV(Cl), непригодна для дискриминации Mo-порфирового и Cu-Au-порфирового оруденения пород шахтаминского комплекса из-за сильного перекрытия полей состава биотита рудоносных и безрудных пород.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400237-8.

Литература

- Azadbakht Z., Lentz D.R., McFarlane C.R., Whalen J.B.* Using magmatic biotite chemistry to differentiate barren and mineralized Silurian–Devonian granitoids of New Brunswick, Canada // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. Vol. 175(7). 69.
- Munoz J.L.* F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 1984. Vol. 13(1). P. 469–493.
- Nash W.P., Crecraft H.R.* Partition coefficients for trace elements in silicic magmas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1985. Vol. 49(11). P. 2309–2322.
- Nevolko P.A., Svetlitskaya T.V., Savichev A.A. et al.* U-Pb zircon ages, whole-rock and zircon mineral geochemistry as indicators for magmatic fertility and porphyry Cu-Mo-Au mineralization at the Bystrinsky and Shakhtama deposits, Eastern Transbaikalia, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 139. P. 104532.
- Rasmussen K.L., Mortensen J.K.* Magmatic petrogenesis and the evolution of (F:Cl:OH) fluid composition in barren and tungsten skarn-associated plutons using apatite and biotite compositions: case studies from the northern Canadian Cordillera // *Ore Geology Reviews*. 2013. Vol. 50. P. 118–142.
- Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S. et al.* Nomenclature of the micas // *Clays and Clay Minerals*. 1998. Vol. 46. P. 586–595.
- Sallet R.* Fluorine as a tool in the petrogenesis of quartz-bearing magmatic associations: applications of an improved F-OH biotite–apatite thermometer grid // *Lithos*. 2000. Vol. 50. P. 241–253.
- Yavuz F.* Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: part II—applications using the computer program Mica+ // *Computer Geosciences*. 2003. Vol. 29. P. 1215–1228.
- Zhang Q., Shao S., Pan J., Liu Z.* Halogen elements as indicator of deep-seated orebodies in the Chadong As–Ag–Au deposit, western Guangdong, China // *Ore Geology Reviews*. 2001. Vol. 18. P. 169–179.

**А.Ш. Шавкина¹, Н.В. Юркевич¹, С.Б. Бортникова¹,
С.С. Волынкин¹, О.Л. Гаськова², В.С. Артамонова³**

¹ – *Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
khusainovaas@ipgg.sbras.ru*

² – *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

³ – *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Поведение бария в экзогенных условиях на примере полиметаллических хвостохранилищ

**A.Sh. Shavekina¹, N.V. Yurkevich¹, S.B. Bortnikova¹,
S.S. Volynkin¹, O.L. Gaskova², V.S. Artamonova³**

¹ – *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

² – *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

³ – *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Supergene behavior of barium on example of sulfide tailing dumps

Abstract. The work studied the supergene behavior of barium during the evolution of a technogenic wastes on example of sulfide tailings of the Salair Ridge. Based on mineralogical and geochemical characteristics of tailings, the formation of authigenic barite is suggested and the Ba sources in the water-rock system are assessed.