

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ ИНДИКАТОРОВ Cu-Mo-Au-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ГРАНИТОИДОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ П-ВА ТАЙМЫР

Берзин С. В.¹, Петров С. В.¹, Конопелько Д. Л.¹, Курапов М. Ю.¹, Червяковский В. С.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: sbersin@ya.ru

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург

Интерес к поиску и разведке Cu-Au-Mo-порфирирового оруденения обусловлен ростом промышленного спроса на медь и прогнозируемым дефицитом этого металла в среднесрочной перспективе. В последние годы при поиске порфирирового оруденения все чаще используются подходы, основанные на использовании минералов-индикаторов в гранитах для определения обстановок кристаллизации и эволюции гранитных расплавов (окисленности, флюидонасыщенности и т.д.). В настоящее время это направление исследований интенсивно развивается.

Были изучены циркон, апатит и титанит из гранитоидов ряда массивов Таймыро-Североземельской складчатой области. Содержания элементов в минералах определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на NexION 300S с приставкой NWR 213 в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН по методике [Зайцева и др., 2016] (диаметр кратера 25 мкм).

В цирконах для анализа LA-ICP-MS выбирались участки кристаллов с тонкой «осциляторной» зональностью, соответствующие «магматическим» цирконам по геохимическим признакам по [Hoskin, 2005], без заметного количества механических включений [Zhong et al., 2018]. Ce и Eu-аномалии в цирконах традиционно рассматриваются как индикаторы окислительно-восстановительного состояния расплавов [Ballard et al., 2002, Lu et al., 2016]. Обогащение Eu и дефицит Y в расплавах и в цирконах обычно объясняется фракционирования амфибола и граната и замедлением фракционирования плагиоклаза в глубинных очагах за счет повышенного содержания воды [Müntener et al., 2001]. Однако по данным [Loader et al., 2017] совместная кристаллизация с титанитом приводит к изменению Eu/Eu* в цирконе, и отчасти изменению Ce/Ce*. Поэтому согласно [Loader et al., 2017] нами были использованы цирконы с содержанием Ta > 0.2 г/т. Температура кристаллизации циркона по содержанию Ti в цирконе по [Watson et al., 2006] соответствует для большей части анализов (с учетом погрешности измерения и пределов обнаружения Ti методом LA-ICP-MS) температуре < 738°C, что является благоприятным признаком для выявления порфирирового оруденения по [Pizarro et al., 2020]. Значения ΔFMQ для цирконов по оксидометру [Loucks et al., 2020] из разных массивов перекрываются в пределах вариаций и в пределах погрешности (±0.6), что не позволило использовать этот параметр для ранжирования массивов гранитоидов.

Апатит является распространенным аксессуарным минералом-индикатором для оценки петрогенезиса магматических горных пород и оруденения [Cao et al., 2012, Mao et al., 2016]. В гранитоидах апатит является минералом концентратором летучих компонентов (F, Cl, SO₃²⁻), в т.ч. фактически единственным минералом концентратором Cl. Апатиты из изученных массивов Таймыра соответствует апатиту из гранитных интрузивов, связанных с медно-порфирировой минерализацией по [Pan et al., 2020]. На диаграммах Eu/Eu*-(La/Yb)_n, Sr/Y - Eu/Eu*, Sr/Y-(La/Yb)_n в апатите практически все изученные пробы попадают в поле составов адакитовых гранитов по [Pan et al., 2020]. Наблюдаемые вариации содержания Sr в апатите могут свидетельствовать о кристаллизации различных зерен апатита на разных этапах эволюции магматического расплава. Низкие содержания в апатитах Mg по [Nathwani et al., 2020] могут свидетельствовать о кристаллизации апатита из существенно фракционированных магм в условиях верхней земной коры. Окислительно-восстановительные условия магм по содержанию Mn в апатите по [Miles et al., 2014] в изученных пробах гранитоидов были оценены в диапазоне logfO₂ -10-12, погрешность logfO₂ ±2,7-3,0 (1σ), что не позволяет использовать этот параметр для ранжирования массивов по перспективам рудоносности.

Титанит из изученных проб гранитоидов характеризуется низким отношением Fe/Al_{ат.} 0,6-1,2, что указывает на магматическое (не гидротермальное) происхождение [Cao et al., 2015]. Титанит из Пекинского, Дорожнинского, Тесемского и Кристифенсенского массивов (кроме пробы ТЗ) по характеру распределения RЗЭ, Zr, Hf, Nb и Ta близок к титаниту из гранитоидов, с которыми связано Cu-Au-Mo-порфирировое оруденение, по данным [Xu et al., 2015].

Таким образом, нами рассмотрены критерии оценки надежности первичных аналитических данных, разбраковка зерен минералов по морфологическим признакам и разбраковка результатов анализов по геохимическим признакам. Важным моментом является учет погрешностей и пределов обнаружения содержания отдельных элементов. Критическое рассмотрение признаков рудоносности по минералам-индикаторам открывает дорогу к заданию весов признакам, что в свою очередь позволяет более точно ранжировать массивы гранитодов по перспективам обнаружения связанного с ними Cu-Mo-Au-порфирирового оруденения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-27-00283).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцева М.В., Пупышев А.А., Щапова Ю.В., Вотяков С.Л. U-Pb-датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NexION300S и приставки для лазерной абляции NWR213 // Аналитика и контроль, 2016. Вып. 20. № 4. С. 294-306.
2. Ballard J.R., Palin J.M., Campbell I.H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002. Vol. 144. P. 347-364.
3. Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from C. Kazakhstan: implications for petrogenesis and mineralization // Resource Geology, 2012. V. 62. P. 63-83.
4. Cao M., Qin K., Li G., Evans N.J., Jin L. In situ LA-(MC)-ICP-MS trace element and Nd isotopic compositions and genesis of polygenetic titanite from the Baogutu reduced porphyry Cu deposit, Western Junggar, NW China // Ore Geology Reviews, 2015. Vol. 65. P. 940-954.
5. Hoskin P.W.O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005. Vol. 69. P. 637-648.
6. Loader M.A., Wilkinson J.J., Armstrong R.N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility // Earth and Planetary Science Letters, 2017. Vol. 472. P. 107-119.
7. Loucks R.R., Fiorentini M.L., Henríquez G.J. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon // Journal of Petrology, 2020. Vol. 61, № 3. ega034.
8. Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., McCuaig T.C., Evans N.J., Yang Z.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits // Society of Economic Geologists Special Publication, 2016. Vol. 19. P. 329-347.
9. Mao M., Rukhlov A.S., Rowins S.M., Spence J., Coogan L.A. () Apatite trace element compositions: a robust new tool for mineral exploration // Economic Geology, 2016. Vol. 111. P. 1187-1222.
10. Miles, A.J., Graham, C.M., Hawkesworth, C.J., Gillespie, M.R., Hinton, R.W., Bromiley, G.D. Apatite: a new redox proxy for silicic magmas // Geochim. Cosmochim. Acta, 2014. Vol. 132. P. 101-119.
11. Müntener O., Kelemen P.B., Grove T.L. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2001. Vol. 141. P. 643–658.
12. Nathwani C.L., Loader M.A., Wilkinson J.J., Buret Y., Sievwright R.H., Hollings P. Multi-stage arc magma evolution recorded by apatite in volcanic rocks // Geology, 2020. Vol. 48. Is. 4. P. 323-327.
13. Pan L.-C., Hu R.-Z., Bi X.-W., Wang Y., Yan J. Evaluating magmatic fertility of Paleo-Tethyan granitoids in eastern Tibet using apatite chemical composition and Nd isotope // Ore Geology Reviews, 2020. Vol. 127. 103757.
14. Pizarro H., Campos E., Bouzari F., Rouse S., Bissig T., Gregoire M., Riquelme R. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits // Ore Geology Reviews, 2020. Vol. 126. P. 1-18.
15. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006. Vol. 151. P. 413-433.
16. Xu L., Bi X., Hu R., Tang Y., Wang X., Xu Y. LA-ICP-MS mineral chemistry of titanite and the geological implications for exploration of porphyry Cu deposits in the Jinshajiang – Red River alkaline igneous belt, SW China // Mineralogy and Petrology, 2015. Vol. 109. P. 181-200.
17. Zhong S., Feng C., Seltmann R., Li D., Qu H. Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition // Lithos, 2018. Vol. 314–315, P. 646-657.