

## МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА: ДАННЫЕ LA-ICP-MS

Корекина М.А., Кабанова Л.Я., Артемьев Д.А.

ИОУ ФНЦ МуГ УрО РАН, Миасс, Россия, maria@mineralogy.ru

В пределах Уральской кварценозной провинции сосредоточено большое количество месторождений кварцевого сырья различного генезиса: это жилы молочно-белого, прозрачного, полупрозрачного и хрусталеносного кварца, используемые в высокотехнологических отраслях промышленности [Anfilogov et al., 2016; Кабанова и др., 2019; Игуменцева и др. 2019; Анфилогов и др., 2012] (табл. 1). Важным показателем чистоты природного кварца является его микроэлементный состав, определяющий схему обогащения кварцевых концентратов и предел обогатимости кварцевого сырья [Ryzhkov et al., 2020; Игуменцева и др., 2018]. Элементы-примеси входят в состав минеральных и флюидных включений, а также в структурную решетку самого кварца. Их содержание зависит от условий формирования месторождений кварца и последующих процессов преобразования кварцевых тел в процессе метаморфизма и метасоматоза.

Основной задачей данного исследования является определение микроэлементного состава кварца

разного генезиса. Микроэлементный состав кварца был определен с использованием метода лазерной абляции на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS). Концентрации элементов, определяемые методом LA-ICP-MS, за счет проведения измерений в свободных от включений областях абляции позволяют получать значения, близкие к содержанию структурных примесей в кварце.

Измерения проводились на плоскополированных кварцевых пластинах толщиной 0.3–1 мм с использованием масс-спектрометра Agilent 7700x с программным комплексом MassHunter и лазерной приставкой New Wave Research UP-213. Для градуировки и расчета использовались международные стандарты стекол USGS BCR-2G и SRM NIST-612. Расчет проводился в программе Iolite с использованием  $^{28}\text{Si}$  в качестве внутреннего стандарта со средним значением 46.7 %.

Основными элементами-примесями в кварце являются Al, Ti, Fe, K, Na, Ca, Cu, Li, Mg, Mn и т.д. (табл. 2). В большинстве образцов кварца наблюдаются

Таблица 1. Генетические типы изученных месторождений кварца

Провинция	Комплекс, массив	Кварценозные районы, группы	Месторождение	Характер образования	Генетический тип	Вмещающие породы	Кварц
Уральская кварценозная провинция	Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс	Кыштымская группа	Жила Болотная (№ 101)	Жила замещения	Гидротермально-метасоматический	Слюдистые сланцы, горнблендиты	Молочно-белый, полупрозрачный, льдистый
			Жила Беркутинская	Жилы замещения	Гидротермально-метасоматический	В разной степени измененные амфиболиты, пегматит	Молочно-белый, полупрозрачный, льдистый, сахаровидный
	Больше-Таловский массив	Наялинская группа золоторудных месторождений	Месторождение Толстиха	Жилы выполнения	Гидротермальный	Габбро-диориты, серпентиниты	Молочно-белый, хрусталеносный
	Джабык-Карагайский метаморфический комплекс		Месторождение Песчаное	Жилы заполнения	Гидротермально-метаморфогенный	Лейкократовые граниты	Молочно-белый, хрусталеносный
	Уралтауский метаморфический комплекс	Сакмарская группа	Новотроицкое месторождение	Жилы выполнения	Гидротермально-метаморфогенный	Графит-мусковит-кварцевые, хлорит- мусковит-кварцевые, сланцы; кварциты	Молочно-белый

Таблица 2. Микроэлементный состав кварца (ppm)

Элемент	Li	Na	Mg	Al	K	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ge	Rb	Sr	Σ
<b>Жила Беркутинская</b>																
Бер2	0.20	4.56	0.32	0.34	6.42	1.06	0.93	1.02	9.58	0.07	0.24	0.65	0.72	0.06	0.04	26.19
Бер5	0.03	1.34	0.10	0.89	1.11	0.16	0.24	0.19	1.68	0.01	0.04	0.11	0.13	0.01	0.02	6.07
Бер7	0.03	0.66	0.09	0.08	0.90	0.12	0.24	0.16	1.85	0.01	0.05	0.10	0.13	0.01	0.00	4.43
Бер8	0.02	0.69	0.09	0.08	0.78	0.12	0.21	0.15	1.60	0.01	0.02	0.07	0.11	0.01	0.00	3.97
Бер9	0.03	0.54	0.08	0.07	0.66	0.13	0.20	0.15	1.45	0.01	0.02	0.07	0.09	0.01	0.00	3.51
<b>Жила Болотная</b>																
Бол2	0.03	0.81	0.92	0.07	1.01	0.18	0.23	0.18	1.67	0.01	0.04	0.13	0.15	0.01	0.00	5.44
Бол35	0.03	0.69	0.11	0.07	0.97	0.15	0.22	0.18	1.62	0.01	0.06	0.10	0.12	0.01	0.00	4.32
Бол5	0.03	0.84	0.11	0.12	0.83	0.14	0.20	0.15	1.72	0.01	0.05	0.08	0.11	0.01	0.00	4.39
Бол8	0.03	55.52	0.11	0.08	0.87	0.15	0.23	0.14	1.82	0.01	0.04	0.09	0.12	0.01	0.00	59.21
Бол10	0.04	0.99	0.13	0.11	1.10	0.19	0.28	0.20	2.32	0.01	0.05	0.12	0.15	0.01	0.00	5.68
Бол21	0.03	0.68	0.11	0.08	0.85	0.16	0.26	0.15	1.70	0.01	0.05	0.10	0.14	0.01	0.00	4.33
<b>Жила Толстиха</b>																
Тол1	0.04	0.69	0.11	0.11	0.91	0.09	0.23	0.15	1.80	0.01	0.03	0.07	0.14	0.01	0.00	4.40
Тол2	0.03	0.67	0.08	0.08	0.71	0.05	0.19	0.16	1.70	0.01	0.02	0.09	0.11	0.01	0.00	3.92
Тол3	0.03	0.65	0.12	0.12	0.95	0.21	0.24	0.14	2.00	0.01	0.02	0.10	0.11	0.01	0.00	4.71
Тол4	0.03	0.88	0.00	0.09	0.83	0.11	0.28	0.16	2.10	0.01	0.04	0.10	0.15	0.01	0.01	4.80
Тол5	0.03	0.64	0.04	0.11	0.64	0.10	0.17	0.13	1.80	0.02	0.06	0.07	0.12	0.01	0.00	3.94
Тол6	0.04	0.65	0.06	0.08	0.81	0.11	0.24	0.13	2.10	0.01	0.05	0.10	0.12	0.01	0.00	4.50
Тол7	0.02	0.61	0.16	0.08	0.78	0.09	0.23	0.11	1.80	0.01	0.03	0.08	0.12	0.01	0.00	4.12
Тол8	0.03	0.66	0.16	0.06	0.60	0.16	0.24	0.09	1.30	0.01	0.05	0.07	0.09	0.01	0.00	3.53
Тол9	0.03	0.79	0.07	0.11	0.99	0.19	0.32	0.16	2.00	0.01	0.00	0.11	0.14	0.01	0.00	4.94
Тол10	0.03	0.64	0.08	0.07	0.77	0.00	0.27	0.18	1.60	0.01	0.05	0.09	0.11	0.00	0.00	3.89
Тол11	0.03	0.68	0.03	0.08	0.89	0.07	0.25	0.18	1.70	0.01	0.03	0.07	0.14	0.00	0.00	4.17
Тол12	0.03	0.65	0.06	0.08	0.73	0.12	0.26	0.17	2.10	0.01	0.05	0.09	0.13	0.01	0.00	4.50
<b>Месторождение Песчаное</b>																
Песч1	0.04	0.71	0.17	0.14	0.87	0.06	0.27	0.20	1.70	0.01	0.05	0.09	0.13	0.01	0.00	4.45
Песч2	0.03	0.62	0.09	0.08	1.00	0.11	0.25	0.13	1.70	0.01	0.04	0.07	0.11	0.01	0.00	4.25
Песч3	0.04	0.76	0.23	0.12	1.20	0.16	0.27	0.16	2.40	0.01	0.03	0.11	0.18	0.01	0.00	5.67
Песч4	0.08	1.30	0.28	0.20	2.30	0.11	0.52	0.29	2.60	0.02	0.11	0.21	0.24	0.02	0.00	8.27
Песч5	0.03	0.75	0.13	0.11	0.94	0.18	0.30	0.17	2.50	0.01	0.00	0.10	0.19	0.01	0.00	5.42
Песч6	0.04	0.82	0.08	0.11	1.30	0.09	0.30	0.19	1.90	0.02	0.05	0.10	0.15	0.01	0.00	5.16
<b>Месторождение Новотроицкое</b>																
Нов1	0.06	0.92	0.20	0.16	3.33	0.30	0.28	0.39	1.11	0.02	0.12	0.39	0.16	0.03	0.01	7.48
Нов2	0.03	0.45	0.49	0.10	1.78	0.16	0.13	0.23	0.86	0.01	0.05	0.22	0.08	0.01	0.00	4.62
Нов3	0.03	0.52	0.10	0.10	1.82	0.16	0.14	0.24	1.52	0.01	0.06	0.20	0.10	0.02	0.01	5.03
Нов4	0.03	0.39	0.08	0.09	1.21	0.25	0.12	0.19	1.47	0.01	0.05	0.14	0.07	0.02	0.00	4.12
Нов5	0.02	0.43	0.28	0.10	1.35	0.10	0.12	0.20	1.60	0.01	0.05	0.17	0.08	0.02	0.00	4.53
Нов6	0.03	0.43	0.46	0.47	1.37	0.14	0.15	0.22	1.65	0.01	0.06	0.17	0.09	0.02	0.01	5.28
Нов7	0.02	0.47	0.09	0.10	1.47	0.10	0.14	0.23	1.65	0.01	0.06	0.18	0.11	0.02	0.00	4.64

низкие концентрации микроэлементов по сравнению со средними концентрациями в природном кварце [Müller et al., 2012]. Повышенные значения Al, K, Mg, Ti, Fe и Mn в ряде образцов связаны с попаданием в область абляции микровключений слюды (биотит, мусковит, парагонит), полевых шпатов (альбит, микро-

клин), дендритов железа, гематита, рутила, альбита. Наличие щелочных и щелочноземельных элементов обусловлено присутствием в кварце флюидных включений, однако на содержание данных элементов в кварце также оказывают влияние минеральные микровключения полевого шпата и слюды. Однако,



6. Blankenburg H.-J., Götze J., Schulz H. Quarzrohstoffe. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie: Leipzig-Stuttgart, 1994. 296 p.
7. Götze J., Pan Y., Muller A., Kotova E.L., Cerin D. Trace Element Compositions and Defect Structures of High Purity Quartz from the Southern Ural Region, Russia // *Minerals*. 2017. V. 7. P. 189.
8. Götze J., Plötze M., Graupner T., Hallbauer D.K., Bray C. Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis and gas chromatography // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. V. 68. P. 3741–3759.
9. Harben P.W. The Industrial Mineral Hand Book – A Guide to Markets, Specifications and Prices. 4th ed. Industrial Mineral Information: London, 2002. 412 p.
10. Miyoshi N., Yamaguchi Y., Makino K. Successive zoning of Al and H in hydrothermal vein quartz // *Am. Mineral*. 2005. V. 90. P. 310–315.
11. Müller A., Ihlen P.M., Wanvik J.E., Flem B. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway // *Miner. Depos.* 2007. V. 42. P. 523–535.
12. Müller A., Wanvik J.E., Ihlen P.M. Petrological and chemical characterization of high-purity quartz deposits with examples from Norway. In *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*, 1st ed.; Götze, J., Möckel, R., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2012. P. 71–118.
13. Ryzhkov V.M., Igumentseva M.A., Shtenberg M.V. Technology for Quality Assessment of Quartz Raw Materials. In: Votyakov S., Kiseleva D., Grokhovsky V., Shchapova Y. (eds) *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2020. P. 195–199.