

Каждый определенный процесс возможно картировать и провести сравнительный анализ распределения с классическими прогнозными и металлогеническими полями. Также можно использовать порядковые эмпирические шкалы для свойств и критических процессов месторождений.

Пространственная информационная модель металлогении территории и, как ее неотъемлемая часть, анализ вторичной геологической информации, являются практической частью любых исследовательских работ. Отсутствие глубокой проработки материалов предшественников и ее сведение лишь к описательному пересказу в отдельном разделе отчета (научного или производственного) не может привести к составлению объемной картины объекта изучения и качественному обоснованию направлений геологоразведочных работ. При ежегодном увеличении информационного потока в среднем на 30 % [Lyman, Varian, 2003] необходимо применение единой и строгой концепции обработки вторичной информации для достижения поставленных целей.

*Работа выполнена в рамках государственного задания лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН по теме «Развитие интегрированной информационной системы для пространственно-временного моделирования рудообразующих систем месторождений стратегических металлов на основе ГИС технологий».*

#### Литература

Изюмов И. В., Карасев В. И., Клеандров М. И. и др. Горное право: Учебник. М.: ООО «ПравоТЭК», 2010. 504 с.

Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третьего поколения). Версия 1.3. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. 169 с.

Kreuzer O. P., Markwitz V., Porwal A. K., McCuaig T. C. A continent-wide study of Australia's uranium potential. Part I: GIS-assisted manual prospectivity analysis // Ore Geology Reviews. 2009. Vol. 38. No 4. P. 334–366.

Lyman P., Varian H. R. How much information. Release of the University of California (Oct. 27). 2003.

Tina Lee Y. Information modeling from design to implementation // National Institute of Standards and Technology, 1999. P. 315–321.

**В. Д. Абрамова**

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН, г. Москва  
winterrain@rambler.ru*

#### **Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором в исследовании распределения элементов платиновой группы в магматических сульфидах**

Магматические сульфиды представляют собой один из наиболее интересных объектов для опробования методом лазерной абляции, поскольку коэффициенты фракционирования рудных металлов в сульфидную жидкость превышают таковые

для силикатного расплава в десятки, сотни и тысячи раз. Таким образом, халькофильные элементы, включая ЭПГ, присутствующие в исходном силикатном расплаве в количестве нескольких миллиграммов на тонну, могут накапливаться в отделяющейся сульфидной жидкости в количестве до сотен и тысяч граммов на тонну. Дальнейшая кристаллизация сульфидного расплава с последовательным выделением моносульфидного твердого раствора (mss), промежуточного богатого медью твердого раствора (iss) и собственных минералов ЭПГ хорошо изучена экспериментально и предсказуема.

Возможная гидротермальная и метаморфогенная переработка первичных магматических ассоциаций нарушает постулированные закономерности распределения и может быть идентифицирована на этой основе. При исследованиях подобных руд могут решаться следующие задачи: фракционирование металлов и лигандов между сосуществующими сульфидами; диагностика собственных субмикронных минеральных фаз по глубине лазерного профиля (т.е. и тех, которые не вскрыты на поверхности); исследование контактов зерен сульфидов, которые часто являются местом кристаллизации редких минералов; изучение твердофазных превращений и замещений методом картирования; исследование распределения рассеянных элементов в сульфидах в масштабе рудного тела, что позволяет сделать выводы о характере процесса концентрирования. Одно из таких детальных исследований магматических сульфидов комплекса Бушвельд проведено параллельно в лабораториях Университета Чикутими (LabMaTer, Канада) и ИГЕМ РАН (ЛАМВ, г. Москва).

Лаборатория LabMaTer оснащена квадрупольным масс-спектрометром Agilent x7700 и лазерной приставкой M-50 resolution Excimer (193 nm). Такой комплект приборов позволяет достигать предела обнаружения ЭПГ в рудах до 10 мг/т. Аналитическая лаборатория ИГЕМ РАН оборудована установкой для лазерной абляции UP-213 производства New Wave Research с длиной волны лазера 213 нм. Все измерения выполнены на квадрупольном масс-спектрометре Thermo Xseries2.

Параметры абляции в LabMaTer: диаметр пятна абляции 33/44 мкм, частота повторения импульсов 10 Гц, плотность энергии пучка 5 Дж/см<sup>2</sup>. При сканировании профилем скорость 6 мкм/сек. Для расчета и калибровки использован комплект стандартов: пирротиновый FeS (LaFlamme-Po727, CANMET) для расчета Pd, Rh, Pt, Ru, Os, Ir и Au и MASS-1 прессованный полиметаллический сульфид (Fe-S-Zn, USGS) для остальных элементов. Стандарт MSS5 (Fe-S, Brenan), содержащий 1 мас. % Ni, применялся для расчета Ni и проверки остальных результатов. Анализы в лаборатории ЛАМВ выполнены при следующих параметрах: плотность энергии 4–7 Дж/см<sup>2</sup>, частота 10 Гц, диаметр пятна абляции 40/60 мкм, скорость сканирования 5 мкм/сек. Для расчета использовался стандарт ро-stc, содержащий 20 г/т Au, Ag и ЭПГ в пирротиновой матрице, изготовленный по методу [Ballhaus, 2002], и MASS-1. Воспроизводимость по стандартам составила <9 %, погрешность по ЭПГ – не более 15 %. Проанализированы <sup>33</sup>S, <sup>57</sup>Fe, <sup>59</sup>Co, <sup>60</sup>Ni, <sup>61</sup>Ni, <sup>63</sup>Cu, <sup>65</sup>Cu, <sup>75</sup>As, <sup>101</sup>Ru, <sup>103</sup>Rh, <sup>107</sup>Ag, <sup>109</sup>Ag, <sup>105</sup>Pd/<sup>108</sup>Pd, <sup>125</sup>Te, <sup>128</sup>Te, <sup>189</sup>Os, <sup>191</sup>Ir, <sup>193</sup>Ir, <sup>195</sup>Pt, <sup>197</sup>Au, <sup>208</sup>Pb and <sup>209</sup>Bi (элементы, выделенные курсивом, имеют справочный характер).

Время измерения при абляции в точке – 120 с, включая 30 с регистрации фона и 30 с промывки прибора после каждого анализа. Расчет проводился в программе Iolite, которая позволяет исключать из расчета микровключения. При расчете профилей минералов в сростании области контактов были исключены. Изотоп <sup>57</sup>Fe исполь-

зовался в качестве внутреннего стандарта. Известно, что наложения аргидов цветных металлов на ЭПГ являются одной из основных проблем количественного ИСП МС анализа. Мы учитывали следующие интерференции:  $^{61}\text{Ni}^{40}\text{Ag} \rightarrow ^{101}\text{Ru}$ ,  $^{63}\text{Cu}^{40}\text{Ag} \rightarrow ^{103}\text{Rh}$ ,  $^{65}\text{Cu}^{40}\text{Ag} \rightarrow ^{105}\text{Pd}$ ,  $^{68}\text{Zn}^{40}\text{Ag}$ ,  $^{108}\text{Cd} \rightarrow ^{108}\text{Pd}$ . Для количественного понимания внесенных аргидами наложений в течение сессии проводился анализ синтетических сульфидов  $\text{NiS}_2$  и  $\text{CuFeS}_2$ . Было рассчитано, что каждый 1 мас. % Ni вносит 0.04 г/т  $^{101}\text{Ru}$ , 1 мас. % Cu – 0.4 г/т Rh. Поэтому из расчетных значений для этих элементов в пентландите, халькопирите и кубаните были вычтены соответствующие величины. Установлено, что содержания Rh в халькопирите не могут быть оценены достоверно даже с учетом проведенной коррекции из-за больших наложений, и их значения не приводятся. Для расчета в халькопирите использовался изотоп  $^{108}\text{Pd}$  вместо более распространенного  $^{105}\text{Pd}$ .

Концентрации ЭПГ в пирротине и троилите, кристаллизующихся из mss, не превышают единиц граммов на тонну, что согласуется с теорией. Продукты кристаллизации iss (халькопирит и кубанит) бедны ЭПГ, что обусловлено кристаллохимическими ограничениями на вхождение крупных ионов и приводит к кристаллизации собственных минеральных фаз ЭПГ или их концентрированию в остаточных экзотических расплавах. Среди основных сульфидов только пентландит способен концентрировать ЭПГ (в основном, Pd и, в меньшей степени, Rh и Ru), что доказывает его позднюю кристаллизацию путем перитектических реакций между mss и сульфидной жидкостью или из остаточного расплава [Kitakaze et al., 2016]. Распадный пентландит, который формируется при твердофазных превращениях mss, не содержит значимых концентраций ЭПГ. Полученные данные по распределению ЭПГ в бушвельдских сульфидах подтверждают высокотемпературный магматический характер контролирующего процесса.

Полученные методические наработки были использованы при анализе сульфидных ассоциаций норильских месторождений в базит-ультрабазитовых интрузивах. Эти месторождения характеризуются большим разнообразием минеральных типов руд, что связано как с зональным строением тел массивных и вкрапленных руд, так и с широким развитием наложенных гидротермальных и контактово-метасоматические процессов. Первые систематические данные позволяют предположить нарастание содержания рассеянных элементов в магматических сульфидах по мере развития процессов обогащения и фракционирования сульфидной жидкости к фронтальным частям потока.

*Исследования поддержаны РНФ (проект № 14-17-00693-П).*

### Литература

Ballhaus C., Sylvester P. Noble metal enrichment processes in the Merensky Reef, Bushveld Complex // Journal of Petrology. 2000. Vol. 41. P. 545–561.

Kitakaze A., Machida T., Komatsu R. Phase relations in the Fe–Ni–S system from 875 to 650 °C // Canadian Mineralogist. 2016. Vol. 54. P. 1175–1186.