

Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С. и др. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 274 с.

Попов В. А., Попова В. И. Минералогия пегматитов Ильменских гор // Минералогический альманах. Т. 9. М.: Ассоциация ЭкоСт, 2006. 151 с.

Atencio D., Andrade M. B., Christy A. G. et al. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // Canadian Mineralogist. 2010. Vol. 48. P. 673–698.

Korinevsky V. G. Spessartine-andradite in scapolite pegmatite, Ilmeny Mountains, Russia // Canadian Mineralogist. 2016. Vol. 53. № 4. P. 623–632.

**А. Г. Николаев<sup>1</sup>, Э. Л. Фахардо Бехарано<sup>1</sup>, М. П. Попов<sup>2,3</sup>,  
Н. В. Сокерина<sup>4</sup>, С. И. Исаенко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> – Казанский федеральный университет, г. Казань  
anatolij-nikolaev@yandex.ru

<sup>2</sup> – Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>3</sup> – Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург  
porovm1@yandex.ru

<sup>4</sup> – Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар  
sokerina@geo.komisc.ru

### **Сравнительная характеристика изумрудов из различных генетических типов месторождений по данным термобарогеохимии**

Изумруд является редкой хромсодержащей разновидностью берилла и встречается в различных промышленно-генетических типах месторождений. Он также относится к небольшой группе драгоценных камней, пользовавшихся большой известностью и высоко ценившихся во все времена. Цель данной работы – определение условий формирования изумрудов по данным исследования флюидных включений. Материалом для исследования послужили изумруды Мариинского месторождения (Уральские изумрудные копи) и месторождений Музо, Коскуэс и Чивор (Колумбийская изумрудная провинция), которые содержат большое количество флюидных включений. Дополнительно были проведены исследования по изучению кристаллохимических особенностей и природы окраски изумрудов с различных месторождений.

Флюидные включения изучались с помощью комплекса, состоящего из термостатика Linkam THMS 600 с рабочим температурным интервалом от –196 до +600 °С, охлаждение проводилось с помощью жидкого азота. Для исследований состава газовой компоненты включений использовался высокоразрешающий КР-спектрометр LabRAM HR800 в диапазоне волн 450–9000 см<sup>-1</sup>, измерения проводились при комнатной температуре. Оптические спектры поглощения записывались на специализированном спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне длин волн 185–3300 нм. Дополнительно оптические спектры записывались на стандартизированном спектрофотометре МСФУ-К. Регистрация оптических спектров поглощения производилась в интервале длин волн 400–800 нм, с шагом 1 нм.

Берилл представляет собой кольцевой силикат бериллия и алюминия  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ . Структура берилла состоит из колец  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ , соединенных атомами Be и Al. Кольца образуют вытянутые вдоль оси шестого порядка колонки, связанные бериллиево-кислородными тетраэдрами и алюмокислородными октаэдрами. Характерной особенностью структуры минерала является наличие достаточно емких полостей-каналов, которые объясняют возможность широкого проявления гетеровалентного изоморфизма с вхождением ионов-компенсаторов. Каналы достаточно большие, могут вмещать молекулы воды, крупные щелочные и щелочноземельные катионы. Для структуры берилла характерно частичное замещение атомов  $\text{Be}^{2+}$  атомами  $\text{Li}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Изоморфизму подвержены и ионы  $\text{Al}^{3+}$  в октаэдрических позициях структуры, которые могут быть замещены трех- и двухвалентными катионами:  $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Si}^{4+}$ . При этом в качестве ионов-компенсаторов в каналы структуры входят крупные катионы щелочных металлов ( $\text{Na}^+, \text{Cs}^+$ ), а также группы  $(\text{OH})^-$ , молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ , ионы  $\text{F}^-$  и др. [Егоров-Тисменко, 2005].

Месторождения изумрудов Колумбии относятся к гидротермальному типу, а месторождения Среднего Урала – к пневматолито-гидротермальному типу эндогенных месторождений [Киевленко и др., 1982]. При сильном увеличении в изумрудах Уральских месторождений обнаружены и описаны следующие минералы – актинолит, слюда, а также флюидные включения сложной формы с газовым пузырьком. В колумбийских образцах выявлены трехфазные включения с пилообразными краями и кубическими кристаллами соли и газовым пузырьком, что является типичным для изумрудов данного района.

**Уральские изумруды.** Температура эвтектики включений в изумрудах варьировала от  $-12.5$  до  $-14$  °C, что указывает на содержание в составе флюида KCl и NaCl. Судя по температурам плавления льда, концентрация солей изменялась от 4.03 до 4.35 мас. % экв. NaCl [Реддер, 1987; Мельников и др., 2008]. Температуры гомогенизации включений в изумрудах составили 244–302 °C. Исследование газовой составляющей включений методом спектроскопии КР показало, что она соответствует  $\text{CO}_2$ .

**Колумбийские изумруды.** Температура эвтектики включений в изумрудах изменялась от  $-77.5$  до  $-65$  °C, что свидетельствует о присутствии в составе флюида LiCl, NaCl и  $\text{CaCl}_2$  [Мельников и др., 2008]. Температуры плавления последнего кристаллика льда соответствуют концентрации солей 35–38 мас. % экв. LiCl [Киргинцев и др., 1972]. В изумрудах месторождения Музо выявлена следующая зональность солевого состава включений: температура эвтектики в центре кристалла составила  $-77.2$  °C, по краям кристаллов –  $-65$  °C. Это указывает на изменение состава флюида во время роста кристалла: в начале его формирования флюид имел состав LiCl-NaCl- $\text{H}_2\text{O}$ , в процессе роста кристаллов происходил привнос  $\text{CaCl}_2$ , что привело к изменению температуры эвтектики во включениях. Изучение температуры гомогенизации включений в колумбийских изумрудах столкнулось с определенными сложностями. Для исследования подбирались включения, имеющие трехкомпонентный состав: газовый пузырек, жидкая фаза и кристалл соли. При нагревании включений до полной гомогенизации они все вскрывались. При температуре 235–248 °C газовые пузырьки исчезают, а при температуре свыше 345 °C кристаллы соли полностью не растворяются, и при этом происходит вскрытие включений.

Исследование газовой составляющей включений колумбийских изумрудов методом спектроскопии КР показало, что она соответствует  $\text{CO}_2$ .

Общей особенностью оптических спектров поглощения изумрудов является наличие двух широких интенсивных полос поглощения в видимой области. Конфигурация спектров поглощения и значение энергии полос поглощения позволяет приписать наблюдаемые полосы электронным переходам в ионах  $\text{Cr}^{3+}$ , которые изоморфно замещают ионы  $\text{Al}^{3+}$  в октаэдрических позициях структуры берилла. Полосы поглощения в районах 416–435 и 600–625 нм обусловлены разрешенными по спине переходами с основного состояния  ${}^4\text{A}_{2g}$  на более высокие энергетические уровни  ${}^4\text{T}_{1g}$  и  ${}^4\text{T}_{2g}$ , соответственно [Платонов и др., 1984; Свиридов и др., 1976]. Дополнительно при длинах волн 670 нм и 689 нм наблюдаются слабые узкие полосы поглощения R-переходов в ионах  $\text{Cr}^{3+}_{VI}$  [Платонов и др., 1984].

В ближней инфракрасной области спектра уральских изумрудов фиксируется широкая и интенсивная полоса поглощения с максимумом в районе 809–852 нм, обусловленная разрешенным по спине электронным переходом  ${}^5\text{T}_2 \rightarrow {}^5\text{E}$  в ионах двухвалентного железа, изоморфно замещающих алюминий в октаэдрических позициях структуры.

Результаты термобарогеохимических исследований включений в изумрудах можно использовать для интерпретации их формирования в различных типах месторождений. Формирование изумрудов на месторождениях Урала и Колумбии происходило в гидротермальную стадию минералообразования. Состав включений в изумрудах из месторождений Колумбии свидетельствует о едином глубинном источнике флюидов. Геологическое строение, контактовые изменения вмещающих жилы пород и геохимические данные позволяют предположить, что источником вещества служили кислые интрузивные породы, а сами месторождения можно отнести к телетермальному типу. Природа окраски колумбийских изумрудов связана исключительно с трехвалентным хромом, который изоморфно замещает алюминий в структуре берилла. На окраску уральских изумрудов влияют также ионы трехвалентного хрома, а также дополнительно на основной тон влияет двухвалентное железо, которое входит в октаэдрические позиции алюминия и тем самым создает дополнительные желтые оттенки в окраске уральских изумрудов.

## Литература

- Егоров-Тисменко Ю. К.* Кристаллография и кристаллохимия. М.: Книжный дом Университет, 2005. 592 с.
- Киевленко Е. Я., Сенкевич Н. Н., Гаврилов А. П.* Геология месторождений драгоценных камней. М.: Недра, 1982. 273 с.
- Киргинцев А. Н., Трушников Л. Н., Лаврентьева В. Г.* Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л.: Химия, 1972. 248 с.
- Мельников Ф. П., Прокофьев В. Ю., Шатагин Н. Н.* Термобарогеохимия. М.: Академический проект, 2008. 222 с.
- Платонов А. Н., Таран М. Н., Балицкий В. С.* Природа окраски самоцветов. М.: Недра, 1984. 196 с.
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах: в 2-х т. Т. 1. М.: Мир, 1987. 560 с.
- Свиридов Д. Т., Свиридова Р. К., Смирнов Ю. Ф.* Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М.: Наука, 1976. 266 с.