

Распределение Na полностью повторяет картину распределения Al в ВЧК (рис. б). Соответственно со структурным Al сопоставляется структурный Na, а с  $Al_{st} + Al_{min} \rightarrow Na_{st} + Na_{min}$ . Точечные графики корреляционной зависимости для пар элементов-примесей Al-Ca, Al-Fe, Al-Mg и Al-K показывают, что их распределение аналогично неоднородному бимодальному распределению Al-Na (рис. б), т. е. выборка этих элементов-примесей также делится на два генетических класса: класс 1 представлен примесями, входящими в структурную решетку кварца, класс 2 дополнен включением в состав кварца минеральных микропримесей. Корреляция между Al и остальными элементами-примесями дает право предполагать, что класс 1 элементов-примесей в ВЧК фиксирует микроизоморфное замещение Si по схеме компенсационного изоморфизма, характерное для уральского типа особо чистого кварца:  $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+} + R^+$ , где  $R^+ = Na^+, K^+$  и  $Li^+$ ;  $2Si^{4+} \rightarrow 2Al^{2+} + R^{2+}$ , где  $R^{2+} = Ca^{2+}, Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ ;  $Si^{4+} \rightarrow Fe^{3+} + R^+$ , где  $R^+ = Na^+, K^+$  и  $Li^+$ .

Таким образом, по результатам статистических исследований анализов высокочистых кварцевых концентратов, произведенных из уральского типа особо чистого кварца, предполагается, что кварцевая крупка наследует элементы-примеси двух генетических групп – структурных и минеральных микропримесей.

### Литература

Андрянов П. Ф., Магдеева З. У., Непряхин А. Е. и др. Окончательный отчет по объекту: «Геолого-технологическая оценка возможности использования кварцитов Восточно-Уфалейской высокобарической зоны (участки Острогорский, Тараторский, Беркутинский) в качестве источника получения высокочистых кварцевых концентратов» за 2011–2013 г. в 6 кн. Уфа: ООО «Суракай», 2013ф.

Минералургия жильного кварца / Под ред. В. Г. Кузьмина, Б. Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.

Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Савичев А. Н. Особо чистый кварц Уфалейского кварценосного района (Южный Урал) // Известия УГГУ. 2018. Вып. 1/49. С. 23–32.

Fox J. The R commander: a basic statistics graphical user interface to R // Journal of Statistical Software. 2005. Vol. 14 (9). P. 1–42.

Götze J., Möckel R. Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Berlin Heidelberg, Springer, 2012. 360 p.

**А. Г. Николаев<sup>1</sup>, М. П. Попов<sup>2,3</sup>, А. В. Низмова<sup>1</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

### Природа окраски и кристаллохимические особенности нефрита Баженовского месторождения хризотил-асбеста (Средний Урал)

Баженовское месторождение является одним из самых крупных месторождений хризотил-асбеста в мире. Оно приурочено к одноименному дунит-гарцбургитовому массиву и является уникальным по своим масштабам. Первые находки нефритов на

Баженовском месторождении сделаны в 2009 г. (устное сообщение Б. А. Точилина). Нефриты найдены на Центральном и Южном участках карьера месторождения в виде контактной зоны между мелкозернистым габбро и серпентинитом. Цвет нефрита варьирует от насыщенного зеленого до серовато-зеленого, редко яблочно-зеленого. Текстура нефрита – массивная, пятнистая и полосчатая. Блочность каменного материала изменяется от 5–7 см до 1.5–2.0 м.

В настоящей работе представлены первые результаты исследования окраски нефритов Баженовского месторождения и дана их кристаллохимическая характеристика. Основной метод исследования – оптическая абсорбционная спектроскопия. Оптические спектры поглощения записывались на специализированном спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне длин волн 185–3300 нм и на стандартизированном спектрофотометре МСФУ-К в интервале длин волн 400–800 нм с шагом 1 нм. Для объективного измерения и описания окраски нефрита использована методика расчета координат цветности по международной колориметрической системе XYZ. Все колориметрические результаты по интерпретации оптических спектров поглощения минералов вынесены на стандартный цветовой треугольник международной комиссии по освещению (МКО-1931). Колориметрические параметры исследуемых минералов ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  – коэффициенты цветности;  $\lambda$  – доминирующая длина волны;  $P$  – плотность основного цветового тона) рассчитывались с использованием программы Spectra. Оптические спектры поглощения записывались с плоскопараллельных препаратов; цвет нефрита – зеленый, различной интенсивности.

Для дополнительного анализа кристаллохимических особенностей нефрита проводились исследования методами спектроскопии комбинационного рассеяния. Съемка образцов производилась на конфокальном рамановском микроспектрометре inVia Qontor. Контроль режимов и обработка данных производилась в программе Wire 5. В работе был использован лазер с длиной волны 532 нм (мощность лазера 500 мВт). Все экспериментальные исследования проводились при комнатной температуре.

Нефрит представляет собой скрытоволоконистый агрегат амфиболового (тремолит или актинолит-тремолитового) состава. Его существенным свойством является высокая вязкость, обусловленная спутанно-волоконистой микроструктурой. В большинстве случаев нефрит состоит из сравнительно маложелезистого тремолита  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ . Амфиболы тремолит-актинолитового ряда относятся к моноклинно-призматическому классу. В кристаллической решетке этих минералов участвуют двойные цепочки кремнекислородных тетраэдров  $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$  с самостоятельным анионом  $[\text{OH}]^-$ , которые чередуются с лентами катионных полиэдров, главным образом, октаэдров. В структуре амфиболов катионные позиции М1, М2 и М3 являются октаэдрическими, а позиция М4 характеризуется восьмерной координацией [Бахтин, 1985; Киевленко, 2000].

Общей особенностью оптических спектров поглощения нефритов Баженовского месторождения является наличие широкой полосы поглощения в ближней инфракрасной области в районе 990 нм (рис. 1). При исследовании конфигурации этой линии и результатов химических анализов нефрита установлено, что она связана со спин-разрешенными переходами  ${}^5\text{T}_2 ({}^5\text{D}) \rightarrow {}^5\text{E} ({}^5\text{D})$  в ионах  $\text{Fe}^{2+}$  в позициях М1, М2 и М3, которые замещают  $\text{Mg}^{2+}$ . Полосы поглощения на длинах волн 440 и 650 нм связаны с ионами  $\text{Cr}^{3+}$ , которые также изоморфно замещают ионы  $\text{Mg}^{2+}$  в октаэдрических позициях. Полосы поглощения в районе 440 и 650 нм в спектре изучаемого нефрита

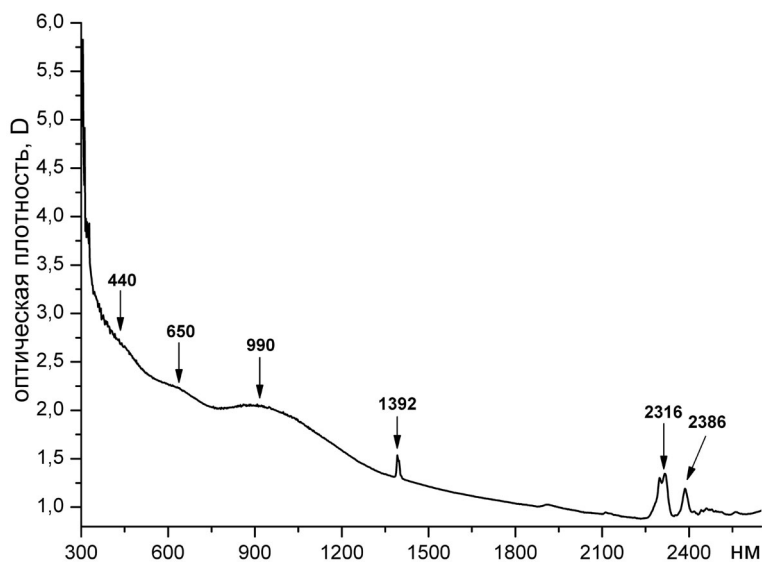


Рис. 1. Оптический спектр поглощения нефрита.

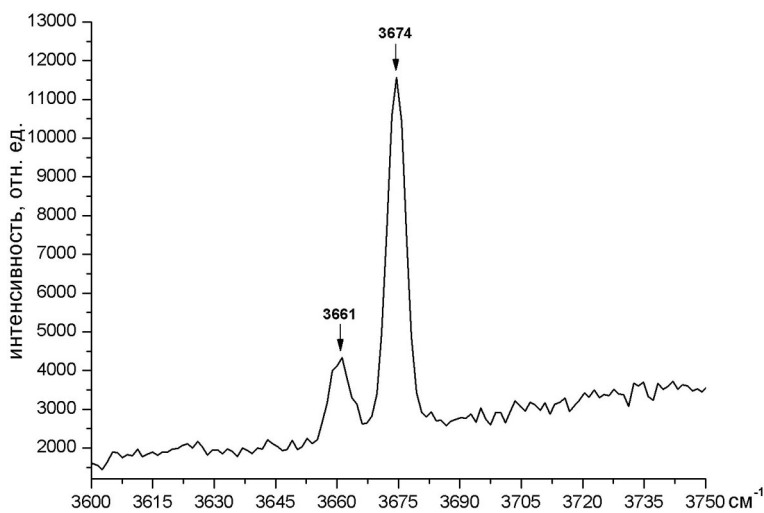


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния ОН-группы в нефрите Баженовского месторождения.

обусловлены разрешенными по спину переходами из основного состояния  ${}^4A_{2g}({}^4F)$  на более высокие энергетические уровни  ${}^4T_{1g}({}^4F)$  и  ${}^4T_{2g}({}^4F)$ , соответственно [Свиридов и др., 1976; Платонов и др., 1984]. Узкие полосы поглощения на длинах волн 2316 и 2386 нм связаны с колебаниями ОН-группы в структуре тремолита, а линия поглощения 1392 нм является первым обертоном основных колебаний ОН-групп [Бахтин, 1985].

По результатам интерпретации оптических спектров поглощения нефрита проведен расчет координат цветности. Цветовые координаты доминирующей длины волны основного цветового тона составили  $\lambda = 576\text{--}578.2$  нм, а величина насыщенности основного цветового тона – 34.4–54.29 %. Линии в спектрах комбинационного рассеяния нефрита Баженовского месторождения, в основном, соответствуют актинолиту [Орлов и др., 2007].

Нефриты с одинаковыми оттенками могут иметь разные диапазоны цветовой насыщенности и интенсивности цветового тона. Поэтому определение цвета невооруженным глазом может быть проблематичным. Основным хромофором, с которым связана окраска нефрита, являются ионы  $\text{Fe}^{2+}$ . Изоморфизм  $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$  в кристаллической структуре тремолита приводит к изменению интенсивности и положения полос ОН-колебаний в инфракрасном диапазоне в районе  $3600\text{--}3700$   $\text{cm}^{-1}$ , что можно использовать для оценки состава нефрита и особенностей его окраски [Burns, Strens, 1966; Плюснина, 1976].

Существует методика определения содержания ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  в кристаллической структуре тремолита по соотношению интенсивности различных полос, связанных с колебаниями ОН-групп [Feng et al., 2017]. По этой методике коэффициент отношения интенсивности полос на длинах волн  $3646$ ,  $3662$  и  $3675$   $\text{cm}^{-1}$  ОН-колебаний около 1 свойственен белому нефриту,  $0.98\text{--}1$  – светло-зеленому,  $0.90\text{--}0.98$  – голубовато-зеленому и менее  $0.91$  – ярко-зеленому. Расчет этого коэффициента позволяет стандартизировать определение цвета нефрита, выявить и дать оценку дополнительных оттенков, которые присутствуют в окраске нефрита [Feng et al., 2017]. Коэффициент отношения интенсивности полос колебаний ОН-групп нефрита Баженовского месторождения составляет  $0.94\text{--}0.95$  (рис. 2). Указанная методика не учитывает желтые оттенки в окраске нефрита, т. к. пока детально не изучена связь линий ОН-группы и ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Таким образом, по результатам КР спектроскопии зеленая окраска нефрита Баженовского месторождения связана исключительно с ионами  $\text{Fe}^{2+}$ .

## Литература

- Бахтин А. И. Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Казанский ун-т, 1985. 192 с.
- Киевленко Е. Я. Геология самоцветов. М.: Земля, 2000. 582 с.
- Орлов Р. Ю., Вигасина М. Ф., Успенская М. Е. Спектры комбинационного рассеяния минералов. М.: ГЕОС, 2007. 142 с.
- Платонов А. Н., Таран М. Н., Балицкий В. С. Природа окраски самоцветов. М.: Недра, 1984. 196 с.
- Плуснина И. И. Инфракрасные спектры минералов. М.: МГУ, 1976. 175 с.
- Свиридов Д. Т., Свиридова Р. К., Смирнов Ю. Ф. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М.: Наука, 1976. 266 с.
- Burns R. G., Strens R. G. J. Infrared study of the hydroxyl bands in clinoamphiboles // Science. 1966. Vol. 153. P. 890–892.
- Feng X., Zhang Y., Lu T., Zhang H. Characterization of Mg and Fe contents in nephrite using Raman spectroscopy // Gems and Gemology. 2017. Vol. 53. № 2. P. 204–212.