

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ КОРУНДА ОТ СОСТАВА ПРИМЕСЕЙ

© 2021 г. Е. С. Сорокина^{1, 2, *}

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119334 Россия

²Майнцский университет им. Иоганна Гутенберга, Johannes Gutenberg University Mainz D 55099,
Mainz, Germany

*e-mail: elensorokina@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 23.03.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

В статье представлены результаты исследований, показывающие, что изменение морфологии корунда связано с различным диапазоном содержания примесей хрома и железа. Ионы Cr^{3+} , превышающие по размеру ионы Al^{3+} , при вхождении в кристаллическую структуру корунда, удлиняют ее вдоль оси c . Совместное вхождение ионов Cr^{3+} и Fe^{3+} приводит к наиболее быстрому росту граней дипирамиды. Более высокое содержание микропримеси железа по сравнению с хромом (3 : 1 и более) приводит к более быстрому росту граней ромбоэдра и пинакоида c .

Ключевые слова: корунд, габитус, простые формы, элементы-примеси

DOI: 10.31857/S0869605521030102

ВВЕДЕНИЕ

Корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ кристаллизуется в тригональной сингонии в дитригонально-скаленоэдрическом классе. Кристаллическая структура минерала определена Л. Полингом и С. Хендриком (Pauling, Hendricks, 1925). Пространственная группа корунда $R\bar{3}c$, параметры элементарной ячейки $a = 4.754 \text{ \AA}$, $c = 12.982 \text{ \AA}$, $Z = 6$, $V = 254.25 \text{ \AA}^3$, количество атомных позиций на полную ячейку $P/U = 30$. Структура минерала состоит из атомов кислорода, слагающих ее по принципу плотнейшей гексагональной упаковки с повторной укладкой в каждом третьем слое. Меньшие по размеру ионы алюминия локализованы в 2/3 от общего количества октаэдрических пустот между плотноупакованными ионами кислорода. Остальные 1/3 пустот вакантны (Балицкий, Лисицына, 1984). Al–O октаэдры принадлежат циклической группе симметрии C_{3v} . Расстояние между атомами в паре Al–O составляет 1.856 и 1.972 Å. Они связаны общей плоскостью, параллельной [0001]. Атом алюминия находится только в одном октаэдре и незначительно смещен относительно его середины (рис. 1).

Кристаллический облик корунда различный, встречается более 75 сочетаний простых форм кристаллов. Однако две вариации последних считаются наиболее распространенными в природе (Сорокина, 2011). Для первого типа (рис. 2) характерно наличие большой грани пинакоида c (0001) в сочетании с шестью гранями призмы z ($22\bar{4}1$) и шестью гранями положительного ромбоэдра r ($10\bar{1}1$) либо двенадцать граней пирамиды ω (14 14 $2\bar{8}$ 3) по шесть сверху и снизу. Для другого вида характерны кристаллы с

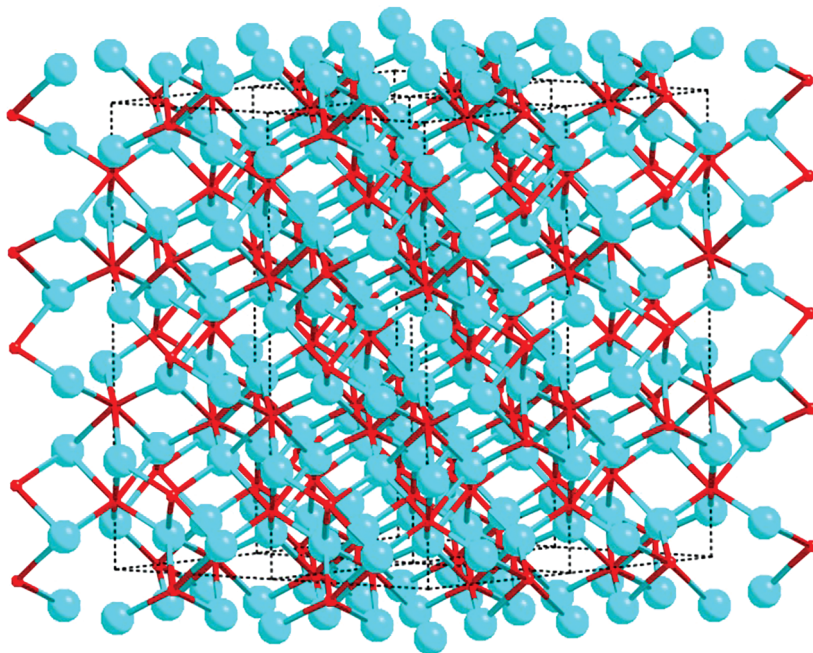


Рис. 1. Кристаллическая структура корунда. Голубым цветом показаны атомы кислорода, красным — атомы алюминия.

Fig. 1. Corundum crystal structure, where blue balls are oxygen atoms and red balls are aluminium atoms.

гранями ромбоэдра r ($10\bar{1}1$), осложненные гранью пинакоида c (0001) и призмы a ($11\bar{2}0$). Кристаллы первого вида типичны для рубина (разновидности корунда, окрашенной ионами Cr^{3+}), кристаллы второго вида — для сапфира (разновидности корунда, окрашенной ионами Fe^{3+} или Fe^{2+} и Ti^{4+}).

Примеры рядов форм кристаллов корунда и других минералов из природных парагенезисов, образовавшихся в средах, различающихся по кислотно-щелочным свойствам, предложены В.А. Поповым (2011). Тем не менее, факторы, влияющие на изменчивость морфологии минерала остаются в большинстве случаев весьма спорными. В статье представлены результаты исследований морфологии кристаллов корунда из месторождений Африки, Юго-Восточной Азии и России, выполненные в 2007–2021 гг. и частично опубликованные в более ранних работах автора (Сорокина, 2011; Сорокина и др., 2012; Sorokina et al., 2016; Litvinenko et al., 2020; Sorokina et al., 2021).

Ранее (Сорокина и др., 2012) были описаны факторы, влияющие на морфологию кристаллов корунда на месторождении Снежное (Памир). Среди них, кроме химического состава минерала, были выделены рН среды, рост в стесненных условиях, влияние силы тяжести, приводящие к искажению габитуса кристаллов корунда и образованию уплощенных форм. Для данной статьи были отобраны образцы минерала, характеризующиеся “свободным” ростом при относительно стабильных условиях. Под “свободным” ростом понимается рост кристаллов, взвешенных в магме или водном растворе (Краснова, Петров, 1995). Кристаллы, характеризующиеся скелетными формами, зарождающиеся на стенках или подложках, а также растущие в стесненных условиях, в том числе в пористых средах, не рассматривались. Под “стабильными” условиями понимались следующие условия роста (Краснова, Петров, 1995): 1) постоян-

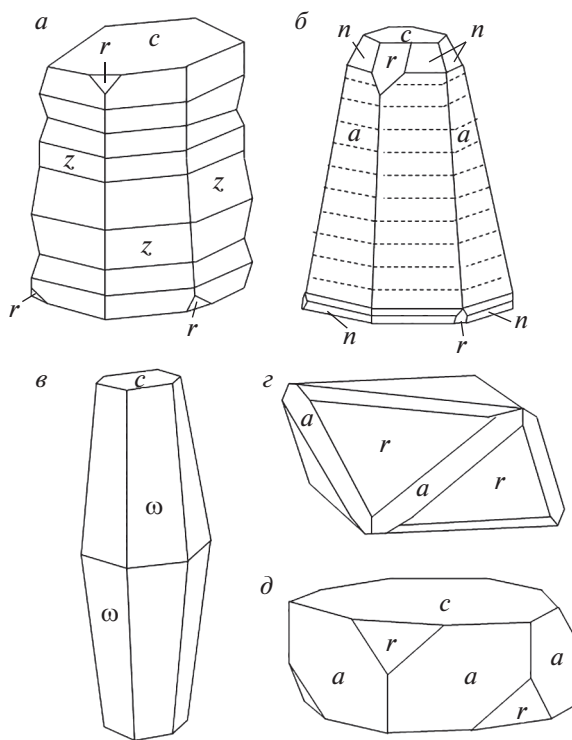


Рис. 2. Основные формы нахождения кристаллов корунда в природе.

Fig. 2. Corundum crystals forms common found in nature.

ные соотношения скоростей роста разных граней, 2) постоянство химического состава кристалла внутри сектора роста в направлении нормали к соответствующей грани, отсутствие зональности и секториальности. Следует отметить, что наличие зональности не обязательно свидетельствует о непостоянстве условий. При стабильности внешних условий существует ряд причин, которые приводят к колебанию скоростей роста (Краснова, Петров, 1995). Поэтому для исследования были выбраны зональные кристаллы корунда только из тех месторождений, которые характеризовались химической гетерогенностью при стабильных P – T условиях роста (Sorokina et al., 2016, Sorokina et al., 2021).

КАМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были отобраны кристаллы корунда с различной морфологией из месторождений разных генетических типов: 1) метаморфических месторождений в мраморах (Люк Ен, Вьетнам; Снежное, Таджикистан) и гнейсах (Морогоро, Танзания; Хит-остров, Карелия), 2) контактово-метасоматических месторождений в плагиоклазовых породах (Гитонга Пит и Аква майн, Кения) и скарнах (Андранондамбо, Мадагаскар), 3) магматического месторождения в сиенит-пегматитах (Ильменские горы, Россия).

Из отобранных кристаллов корунда были изготовлены пластины, ориентированные перпендикулярно и параллельно оси c . Содержания типичных для корунда примесей Cr, Ti, V, Fe, Ga, Mg (Emmet et al., 2017) определялись методом LA-ICP-MS и

электронно-зондового микроанализа (EMPA) в Институте наук о Земле Университета им. Иоганна Гутенберга г. Майнц (Германия) на базе квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500se в сочетании с лазером ESI NWR193, а также на электронном микроскопе JEOL JXA 8200 с волновым спектрометром. Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 20 нА, время измерения: 20 с для Al, 80 с для Si, 100 с для Ti, Cr, Mn и Fe, 200 с для V и Ga. Диаметр зонда – 3 мкм. Природные и синтетические стандартные образцы: Al₂O₃ для Al, Cr₂O₃ для Cr, Fe₂O₃ для Fe, GaAs для Ga, MgO для Mg, MnTiO₃ для Ti, металлический V для V и волластонит для Si. Поправка на измерения применена для Ti > V и V > Cr. Пределы обнаружения измеряемых элементов: Ti 60 мкг/г, V 118–446 мкг/г, Ga 132–472 мкг/г, Fe 74–76 мкг/г, Cr 220–370 мкг/г, Mn 58–224 мкг/г, Mg 90–256 мкг/г. LA-ICP-MS измерения проводились по профилям, параллельным профилям EMPA с использованием лазера ESI NWR193 ArF в сочетании с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 7500se. Забор проб для анализов проводился лазером с пучком 70 мкм при частоте повторения 10 Гц и плотности энергии примерно 3.0 Дж/см². Время разогрева/фона составляло 15 с, время выдержки – 30 с и время промывки – 20 с. Синтетическое стекло NIST SRM 612 использовалось в качестве стандартного образца для калибровки с предпочтительными значениями для NIST SRM 612 в базе данных GeoReM. Применялось синтетическое стекло NIST SRM 610 и базальтовое стекло USGS BCR-2G в качестве материалов для контроля качества (QCM). Разрешенный во времени спектр обрабатывался с помощью программы GLITTER 4.4.1 (www.glitter-gemoc.com, Университет Маккуори, Сидней, Австралия) с использованием ²⁷Al в качестве внутреннего стандарта и содержания Al₂O₃, определенного с помощью метода EMPA для образцов корунда. Измеренные концентрации для QCM не превышают 15% от предпочтительных значений для QCM в базе данных GeoReM. Средние пределы обнаружения рассчитывались из измерений стандартных образцов (мкг/г): Mg 2.2, Ti 3.8, V 0.2, Mn 1.0, Ga 0.2 и Cr 3.2. Из-за полиатомных интерференций при измерении Fe в атмосфере аргона и кислорода концентрации этого элемента указаны только по данным EMPA. Для образцов с видимой цветовой зональностью были получены фотолюминесцентные карты по методике (Häger, Dung, 2000) с помощью рамановского спектрометра Horiba Yobin Yvon HR800 в сочетании с микроскопом Olympus BX41 и автоматическим XYZ-столиком. Использовался красный гелий-неоновый лазер с $\lambda = 633$ нм (поляризованный во время измерений) при увеличении $\times 50$ для диапазона измерений 697–709 нм. Относительное содержание хрома определялось с использованием соотношения пиков N-линий примерно около 701.55 к 707.2 нм (Häger, Dung, 2000). Спектрометр был откалиброван для длины волны около 520.7 см⁻¹ с использованием Si в качестве эталона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Физические свойства изученных кристаллов оказались близкими к свойствам кристаллов корунда из других месторождений (Hughes, 2017). Коэффициенты преломления $n_o = 1.762–1.765$, $n_e = 1.772–1.775$, величина двупреломления составляет 0.008–0.009. Удельный вес колеблется в пределах от 3.99 до 4.02 г/см³.

Исследованные образцы имеют различную окраску. Неоднородный ярко-красный цвет со слегка лиловым оттенком до красновато-розового наблюдается у рубинов из мраморов Вьетнама (месторождение Люк Йен). Близкую окраску имеют кристаллы корунда из Таджикистана. Рубины из месторождения Хит-остров (Карелия) имеют темно-красный цвет. Кристаллы из Кении (месторождение Мангари-Аква майн и Гитонга Пит) зональные по окраске с ярко-красной каймой и белой центральной частью (рис. 3). Зональность этих кристаллов местами связана с игольчатыми микровключениями рутила, локализованными вдоль оси *c* кристаллов корунда. Допол-

нительно были исследованы сапфиры розового цвета из Танзании (месторождение Морогоро). Сапфиры из Мадагаскара (месторождение Андранондамбо) имеют сине-фиолетовый и серо-голубой цвета, сходные с окраской кристаллов корунда из Ильменских гор (копь 298). В последнем случае кристаллы зональны с темно-коричневым центром и серо-голубой промежуточной и краевой зонами.

При исследовании химического состава корунда было обнаружено, что вариации примесного состава минерала связаны с изменчивостью его морфологии и цветовых характеристик (рис. 4). Кристаллы корунда из Аква майн и Гитонга Пит (Кения) имеют сходный механизм роста: процесс накопления хрома демонстрирует колебательное поведение с увеличением содержаний примеси на заключительных этапах кристаллизации. Габитус и цвет минерала варьируют от белого и дипирамидального в центральной части кристаллов ($\text{Cr} < 500\text{--}1000$ мкг/г) до красного и призматического в краевых частях кристаллов ($\text{Cr} > 1500$ мкг/г) (Sorokina et al., 2016). Наблюдались розовый цвет и комбинации габитусных форм (дипирамидальной, призматической или дипирамидально-призматической) с концентрацией Cr от 500 до 1300–1500 мкг/г (рис. 3). Фотолюминесцентное картирование ионов Cr^{3+} выявило более высокое содержание хрома в области красноокрашенной каймы кристаллов, тогда как самое низкое содержание хрома было обнаружено в их белой, центральной части (рис. 3).

Сходные результаты были получены для кристаллов корунда розового и красного цвета из месторождения Люк Йен (Вьетнам). Более низкие концентрации хрома (около 1000 мкг/г) здесь характерны для отдельных участков кристаллов розового цвета с тенденцией к образованию дипирамидных граней. Более высокие содержания (> 1500 мкг/г) связаны с призматическими участками кристаллов, окрашенными в ярко-красный цвет (рис. 4).

В ярко-красных призматических кристаллах из месторождения Снежного (Таджикистан) зафиксированы содержания Cr 800–4700 мкг/г и Fe 400–600 мкг/г. В розовом корунде месторождения Морогоро (Танзания), кристаллы которого отличаются дипирамидальным габитусом, содержания примесей составляют: Cr 500–700 мкг/г, Fe ~ 700 мкг/г (рис. 4). В призматических кристаллах из Хит-острова (Карелия) содержание Cr составляет 900–1800 мкг/г, Fe – 2000–4600 мкг/г. В сине-фиолетовых ромбоэдрических корундах месторождения Андранондамбо (Мадагаскар) содержание Cr равно около 600 мкг/г, тогда как количество Fe достигает 2000 мкг/г. В зональных коричнево-синих кристаллах корунда из Ильменских гор содержание Cr оказалось ниже порога обнаружения, однако некоторое его количество (< 9 мкг/г) было зафиксировано в центральной части одного из кристаллов на фотолюминесцентной карте (Sorokina et al., 2016); содержание Fe здесь варьировало от ~1800 до ~3100 мкг/г (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно полученным результатам, дипирамидальный габитус в сочетании с белым цветом выявлены в кристаллах корунда из месторождений Мангари (Гитонга Пит и Аква майн в Кении) с содержанием Cr < 500 мкг/г, тогда как призматический габитус и ярко-красный цвет характерны для кристаллов корунда из кенийских и вьетнамских месторождений с содержанием Cr > 1500 мкг/г. Розовый цвет кристаллов и комбинации габитусных форм (дипирамидального, призматического или дипирамидально-призматического) связаны с содержанием Cr в корунде, варьирующим от 500 до 1500 мкг/г (Sorokina et al., 2016). Содержания Cr > 800 мкг/г и Fe < 600 мкг/г характерны для призматических розовых кристаллов корунда из месторождения Снежное в Таджикистане (Litvinenko et al., 2020). Более низкое содержание Fe (< 800 мкг/г) характерно для кристаллов розового сапфира, удлиненных вдоль оси *c* из месторождения Морогоро (Танзания). Сочетание более высокого содержания Fe (> 2000 мкг/г) с содержанием Cr > 900 мкг/г характерно для призматических кристаллов корунда из месторождения

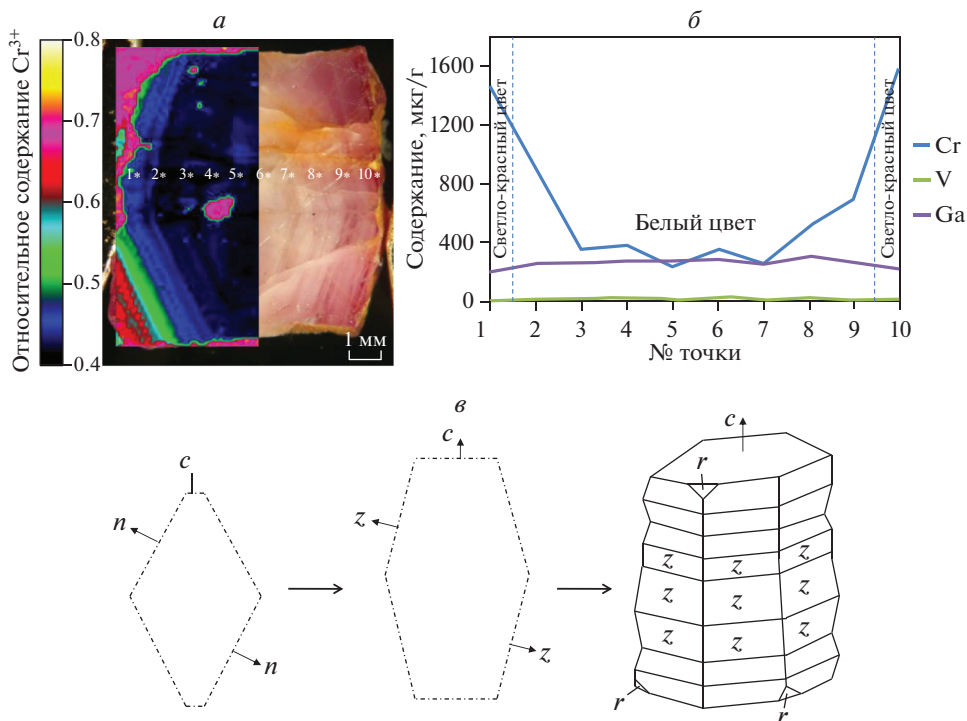


Рис. 3. Особенности состава и морфологии кристалла корунда из месторождения Гитонга Пит (Кения). По (Sorokina et al., 2016). *a* – кристалл корунда, ориентированный параллельно оси *c* (справа), и фотолуминесцентная карта распределения Cr^{3+} (слева); *б* – содержания примесей Cr, V и Ga по профилю, показанному на рис. 3, *а*; *в* – изменение габитуса того же кристалла в процессе роста.

Fig. 3. Features of composition and morphology of the corundum crystal from the Gitonga pit (Kenya). Modified after Sorokina et al., 2016.

Хит-остров (Карелия). Ромбоэдрическая форма и сине-фиолетовый цвет наблюдались при содержаниях Cr < 500 мкг/г и Fe > 2000 мкг/г в сапфирах Андранондамбо из Мадагаскара (Sorokina et al. 2016). В то же время пинакоидальный габитус оказался характерен для зональных коричнево-синих кристаллов корунда из Ильменских год, содержание Fe в которых превышает 1800 мкг/г (Sorokina и др 2021). Таким образом, содержание Cr 500–700 мкг/г является пограничным для кристаллов корунда с различными габитусными формами.

Влияние химического состава на габитус корунда обусловлено различиями в адсорбции гранями кристаллов минерала тех или иных микроэлементов. В табл. 1 приведены параметры элементарной ячейки минералов, изоструктурных корунду и являющихся крайними членами в рядах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$ (эсколаит) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ (гематит). Из табл. 1 следует, что параметр *c* в элементарной ячейке эсколаита возрастает по сравнению с корундом, однако отношение *a/c* остается примерно одинаковым. Таким образом, ионы Cr^{3+} , превышающие по размеру ионы Al^{3+} , при вхождении в кристаллическую структуру корунда, удлиняют ее вдоль оси *c* (рис. 4). Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными: добавление микропримеси хрома к Al_2O_3 при синтезе корунда приводит к росту кристаллов корунда, удлиненных вдоль

Таблица 1. Параметры элементарной ячейки корунда и изоструктурных ему эсколаита, гематита и ильменита (www.mindat.org)**Table 1.** Cell parameters of corundum, and isostructural eskolaite, hematite, and ilmenite (www.mindat.org).

| Минерал | $a, \text{Å}$ | $c, \text{Å}$ | $a : c$ |
|---------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------|
| Корунд Al_2O_3 | 4.75 | 12.98 | 1 : 2.733 |
| Эсколаит Cr_2O_3 | 4.95 | 13.58 | 1 : 2.743 |
| Гематит Fe_2O_3 | 5.04 | 13.77 | 1 : 2.274 |
| Ильменит $\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+}\text{O}_3$ | 5.09 | 14.09 | 1 : 2.769 |

оси c (Hurlbut, Klein, 1985). Большое содержание ионов Fe^{3+} , также превышающих по размеру ионы Al^{3+} , по сравнению с Cr^{3+} (3 : 1 и более) приводит к изменению поверхностной энергии и, как следствие, увеличению параметров c и a элементарной ячейки корунда (табл. 1) при практически неизменном отношении a/c . Это приводит к более быстрому росту граней ромбоэдра r ($10\bar{1}1$) и пинакоида c (0001) (рис. 4).

В ранее опубликованной работе (Surescu et al., 2010) приведены результаты рентгенодифракционного исследования нанокompозитных материалов, изоструктурных ко-

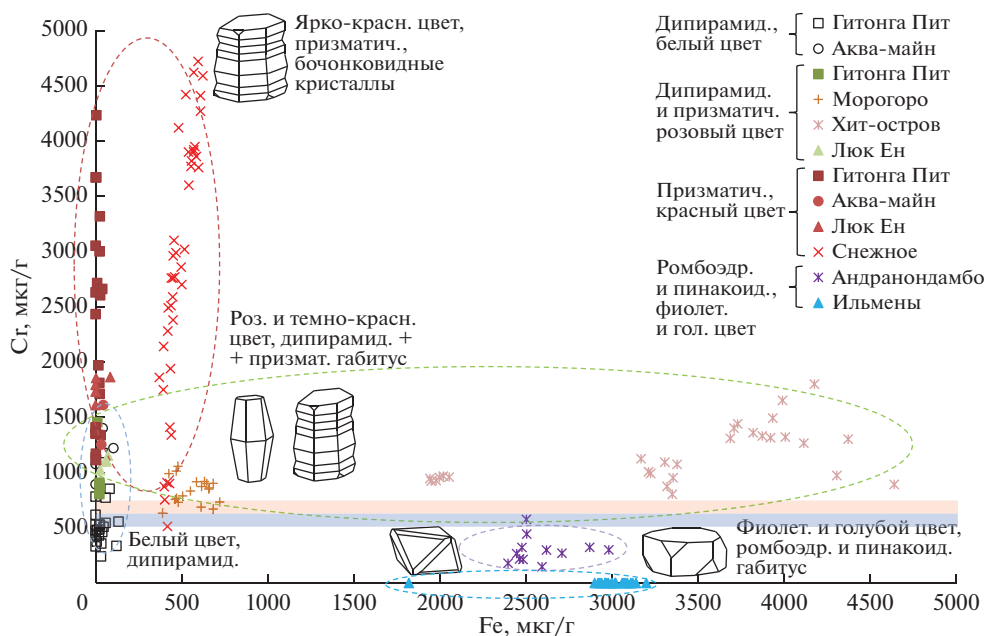


Рис. 4. Зависимость между содержаниями примесей Cr и Fe, габитусными формами и цветом кристаллов корунда из месторождений Восточной Африки, Юго-Восточной Азии и России (Sorokina et al., 2016; Litvinenko et al., 2020; Sorokina et al. 2021; настоящая статья). Синяя и красная полосы в интервале содержаний Cr 500–700 мкг/г соответствуют переходной области между кристаллами корунда с различной морфологией и окраской.

Fig. 4. Relations between Cr and Fe trace element contents, the habit, and colour of corundum crystals from deposits in East Africa, Southeast Asia and Russia (Sorokina et al., 2016; Litvinenko et al., 2020; Sorokina et al., 2021, and unpublished author data).

рунду, с химической формулой $x\text{Cr}_2\text{O}_3-(1-x)\alpha-\text{Fe}_2\text{O}_3$, где x варьирует от 0 до 1. При уменьшении молекулярного количества Cr от 1.0 до 0.4 происходит постепенное увеличение параметров элементарной ячейки исследованных наночастиц (от 4.95 до 5.04 для параметра a и от 13.58 до 13.77 для параметра c). Этот результат согласуется с аналитическими данными, полученными в данной работе: повышение содержаний ионов Cr^{3+} и Fe^{3+} в кристаллах корунда (до 500–700 мкг/г) приводит к наиболее быстрому их росту как вдоль оси c , так и в поперечном направлении. В таком случае наиболее быстро растущими гранями будут грани дипирамиды ω (14 14 $\bar{2}$ 3) (рис. 4).

Таким образом, изменение морфологии кристаллов корунда связано с различным диапазоном содержаний в них Cr и Fe.

Автор благодарит акад. Л.Н. Когарко, проф. Р.Е. Бочарникова, проф. В. Хофмейстера, д-ра Т. Хэгера, д-ра Р. Мертц-Краус за помощь в аналитических исследованиях и обсуждение результатов работы. Автор выражает признательность анонимным рецензентам, чьи комментарии улучшили рукопись. Работа поддержана стипендией им. Александра фон Гумбольдта и ГЕОХИ РАН (№ темы 0137-2019-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балицкий В.С., Лисицына Е.Е. Синтетические аналоги и имитации природных драгоценных камней. М.: Недра, 1984. 158 с.

Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Санкт-Петербург: Невский курьер, 1997. 228 с.

Сорокина Е.С. Онтогенез и качество ювелирного рубина месторождений Центральной и Юго-Восточной Азии. Дисс. ... канд. г.-м. наук. М., 2011. 164 с.

Сорокина Е.С., Ожогина Е.Г., Якоб Д.Е., Хофмейстер В. Некоторые особенности онтогенеза корунда и качество рубина месторождения Снежное, Таджикистан (Восточный Памир) // ЗРМО. 2012. № 6. С. 95–103.

Попов В.А. Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 167.

Relations Between Morphology of Corundum and Trace Element Composition

E. S. Sorokina^{a, b, *}

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia

^bJohannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany

*e-mail: elensorokina@mail.ru

The paper displays results of the study, which show that changes of corundum morphology are directly linked with various ranges of minor Cr and Fe contents. Cr^{3+} ions, being larger than Al^{3+} ions, entering in the crystal structure make it elongated along the axis c . The mutual entering of Cr^{3+} and Al^{3+} ions leads to the accelerated growth of the dipyrmidal faces. The larger content of minor Fe, as related the Cr one (3 : 1 and more) put forward to the quicker growth of rhombohedron and the c pinacoid faces.

Keywords: corundum, morphology, crystal simple forms, minor elements

REFERENCES

Balitsky V.S., Lisitsyna E.E. Synthetic analogues and imitations of natural gemstones. Moscow: Nedra, 1984. 158 p. (in Russian).

Emmett J., Stone-Sundberg J., Guan Yu., Ziyin S. The role of silicon in the color of gem corundum. *Gems Gemol.* 2017. N 53. P. 42–47.

Häger T., Dung P.T. Quantitative fluoreszenz-Spektroskopie an natürlichen und synthetischen rubinen. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy.* 2000. Vol. 12. N 1. P. 72 (in German).

Hughes R.W. Ruby and sapphire: a gemologist's guide. RWH Publishing/Lotus Publishing, 2017. 816 p.

- Hurlbut C.S., Klein C. Manual of Mineralogy. New York: Wiley, 1993. 681 p.
- Krashova N.I., Petrov T.G. Genesis of mineral individuals and aggregates. Saint-Petersburg: Nevskiy kur'er, **1997**. 228 p. (in Russian).
- Litvinenko A.K., Sorokina E.S., Häger T., Kostitsyn Y.A., Botcharnikov R.E., Somsikova A.V., Ludwig T., Romashova T.V., Hofmeister W. Petrogenesis of the Snezhnoe Ruby Deposit, Central Pamir. *Minerals*. **2020**. Vol. 10. 478. P. 1–22.
- Pauling L., Hendricks S.B. The crystal structures of hematite and corundum. *J. Am. Chem. Soc.* **1925**. N 47. P. 781–790.
- Popov V.A. Practical genetic mineralogy. Ekaterinburg: Ural Branch RAS, **2011**. 167 p. (in Russian).
- Sorescu M., Diamandescu L., Tarabasanu-Mihaila D., Krupa S., Feder M. Iron and chromium mixed-oxide nanocomposites. *Hyperfine Interact.* **2010**. N 196. P. 359–368.
- Sorokina E.S. Ontogeny and quality of gem ruby from the deposits of Central and South-East Asia. Ph.D. thesis. Moscow: Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources, **2011**. 164 p. (in Russian).
- Sorokina E.S., Ozhogina E.G., Jacob D.E., Hofmeister W. Some features of corundum ontogeny and the quality of ruby from Snezhnoe deposit, Tajikistan (the Eastern Pamirs). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2012**. N 6. P. 95–103 (in Russian).
- Sorokina E.S., Botcharnikov R.E., Kostitsyn Yu.A., Rösel D., Häger T., Rassomakhin M.A., Kononkova N.N., Somsikova A.V., Berndt J., Ludwig Th., Medvedeva E.V., Hofmeister W. Sapphire-bearing magmatic rocks trace the boundary between paleo-continent: A case study of Ilmenogorsky alkaline complex, Uralian collision zone of Russia. *Gondwana Res.* **2021**. N 92. P. 239 – 252.
- Sorokina E.S., Hofmeister W., Häger T., Mertz-Kraus R., Buhre S., Saul J.M. Morphological and chemical evolution of corundum (ruby and sapphire): Crystal ontogeny reconstructed by EMPA, LA-ICP-MS, and Cr³⁺ Raman mapping. *Amer. Miner.* **2016**. N 101. P. 2716–2722.
- Sorokina E.S., Karamelas S., Nishanbaev T.P., Nikandrov S.N., Semiannikov B.S. Sapphire megacrysts in syenite pegmatites from the Ilmen Mountains, South Urals, Russia: New mineralogical data. *Canad. Miner.* **2017**. N 55. P. 823–843.
- Sorokina E.S., Koivula J.I., Muyal J., Karamelas S. Multiphase fluid inclusions in blue sapphires from the Ilmen Mountains, Southern Urals. *Gems Gemol.* **2016**. N 52. P. 209–211.