

УДК: 548.2:549.5: 550.8.052

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОПРИМЕСЕЙ В ПЕРОВСКИТЕ
ИЗ СКАРНОВ И ЖИЛЬНЫХ КАЛЬЦИТОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОГО
И НАЗЯМСКОГО ХРЕБТОВ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

С.Ю. Степанов¹, Л.Н. Шарпёнок², Р.С. Паламарчук³, А.И. Глазов³

¹*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург; stepanov-1@yandex.ru*

²*Всероссийский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург;*

³*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург*

**DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS IN PEROVSKITE FROM SKARNS AND
CALCITE VEINS OF THE CHERNAYA RECHKA AND NAZYAM RIDGES
(SOUTH URALS)**

S.Yu. Stepanov¹, L.N. Sharpenok², R.S. Palamarchuk³, A.I. Glazov³

¹*Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS; stepanov-1@yandex.ru*

²*Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg;*

³*Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

Изучены крупные индивиды перовскита кубического, октаэдрического и тетрагексаэдрического габитуса из скарнов и жильных тел Ахматовской и Перовскитовой копей Чернореченского и Назямского хребтов и распределение в перовскитах микропримесей с помощью ЛА-ИСП-МС анализа. Перовскит из везувиан-гранатового скарна Ахматовской копи характеризуется низкими содержаниями редкоземельных элементов (РЗЭ) и высокими – Si, Al, Zr и Fe. Перовскит из жильных кальцитовых образований Перовскитовой копи характеризуется повышенными содержаниями РЗЭ, что указывает на различные условия образования перовскитов этих минеральных ассоциаций. Перовскитам из пород Перовскитовой копи свойственно закономерное уменьшение содержания РЗЭ от ранних относительно высокотемпературных образований к поздним.

Илл. 6. Табл. 1. Библ. 14.

Ключевые слова: скарновые образования, Кусинско-Копанский габбровый интрузив, перовскит, форма кристаллов, микропримеси, редкоземельные элементы, карбонатиты, кимберлиты, Южный Урал.

Trace element distribution and crystal morphology of perovskite from garnet-vesuvianite skarn of the Akhmatovskaya mine and chlorite-perovskite-calcite veins of the Perovskitovaya mine (South Urals) were studied using LA-ICP-MS. Perovskite from the Akhmatovskaya mine has low contents of REEs and high contents of Si, Al, Zr and Fe. Perovskite from the Perovskitovaya mine is enriched in REEs. The different contents of trace elements reflects distinct formation conditions of minerals. Perovskite from the Perovskitovaya mine are characterized by regular decrease in REE content from early, relatively high-temperature crystals to late ones.

Figures 6. Table 1. References 14.

Key words: skarns, Kusa-Kopanka gabbro intrusion, perovskite, crystal morphology, trace elements, rare earth elements, carbonatites, kimberlites, South Urals.

Введение

Перовскит – часто встречаемый акцессорный минерал в породах ультраосновных-щелочных массивов с карбонатитами. Однако крупные индивиды перовскита, в некоторых случаях достигающие 9 см по грани куба [4], представляют редкость и добываются для коллекций уже на протяжении двухсот лет из старинных копей Шишимских, Чернореченских и Назямских гор Златоустовского горного округа на Южном Урале; в образцах из Ахматовской копи перовскит был открыт Г. Розе [14]. Перовскитовые копии с уникальным проявлением перовскит-магнетит-клинохлоровой минерализации с крупными кристаллами перовскита находятся на западном склоне Чернореченского хребта, Ахматовская копь – в 9 км СВ на одном из западных отрогов Назямского хребта.

Ряд исследователей относили ассоциации пород, вскрытых этими копиями, к высокотемпературным магнезиальным скарнам [2, 5; и др.]. Некоторые из геологических тел, выполненных кальцитовым агрегатом в сочетании со специфичными минералами, рассматривались и как карбонатитовые образования [1, 7–9].

Целью данной работы является изучение характера распределения редкоземельных элементов в кристаллах перовскитов различного габитуса из гигантозернистых кальцитовых жильных тел Перовскитовых копей, а также из везувиан-гранатовых апогаббровых скарнов Ахматовской копии. В процессе исследований проведён анализ распределения микропримесей, в том числе и РЗЭ, в перовскитах из крупнокристаллических кальцитовых тел и скарнов Чернореченского и Назямского хребтов в сравнении с перовскитами из кимберлитов и пород щёлочно-ультраосновных массивов с карбонатитами.

Методика работ

Из выработок Перовскитовых копей были отобраны кристаллы перовскита величиной 0.4–5 см. Определение габитусных форм кристаллов проводилось с использованием двукружного отражательного гониометра. Индивиды перовскита распиливались вдоль кристаллографических направлений и изучались с использованием оптической и электронной микроскопии.

В отвалах одной из выработок Ахматовской копии отобраны штуфы везувиан-гранатовых скар-

нов с перовскитовой минерализацией; петрографические шлифы и прозрачно-полированные шлифы изучены с применением оптической и электронной микроскопии.

Состав элементов-примесей в перовскитах определён в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN-DRC-6100 (аналитик В.А. Шишлов) с применением локального анализа методом лазерной абляции при помощи системы лазерного пробоотбора в комплекте с эксимерным лазером DUV 193 (Lambda Physic Complex 102); анализируемая навеска отобрана лазерным зондом из заданного участка образца диаметром от 10 до 200 мкм.

Геологическое строение минерализованных зон, вскрытых копиями и пространственно связанных с Кусинско-Копанским интрузивом

Все минеральные копии Шишимских, Чернореченских и Назямских гор (Большая Шишимская, Прасковье-Евгеньевская, Перовскитовая и другие), а среди них и самые знаменитые Ахматовская и Николае-Максимилиановская, имеют пространственную сопряжённость с Кусинско-Копанским клинопироксенит-габбровым интрузивом одноимённого комплекса. Выработки копей расположены вдоль узкой полосы, ориентированной в северо-восточном направлении на протяжении около 18 км (рис. 1).

В составе кусинско-копанского клинопироксенит-габбро-гранитового комплекса выделены две фазы внедрения [3]: к первой отнесены клинопироксенит-габбровые породы, ко второй – Рябиновские граниты. Интрузивные породы граничат с доломитами саткинской свиты на западе и с метаморфизованными вулканитами основного состава кувашской свиты на востоке (см. рис. 1).

Магматиты Кусинско-Копанского клинопироксенит-габбрового интрузива в пределах гряды Шишимских и Назямских гор и Чернореченского хребта представлены преимущественно амфиболовыми габбро и характеризуются наибольшей мощностью в южной части. С юга на север увеличивается степень метаморфических преобразований габбро в районе Ахматовской и Николае-Максимилиановской копей. Амфиболовые габбро содержат значительную примесь магнетита и титаномагнетита, вплоть до перехода в рудные габбро [6]. С выходами рудных габбро Кусинско-Копанского интрузива

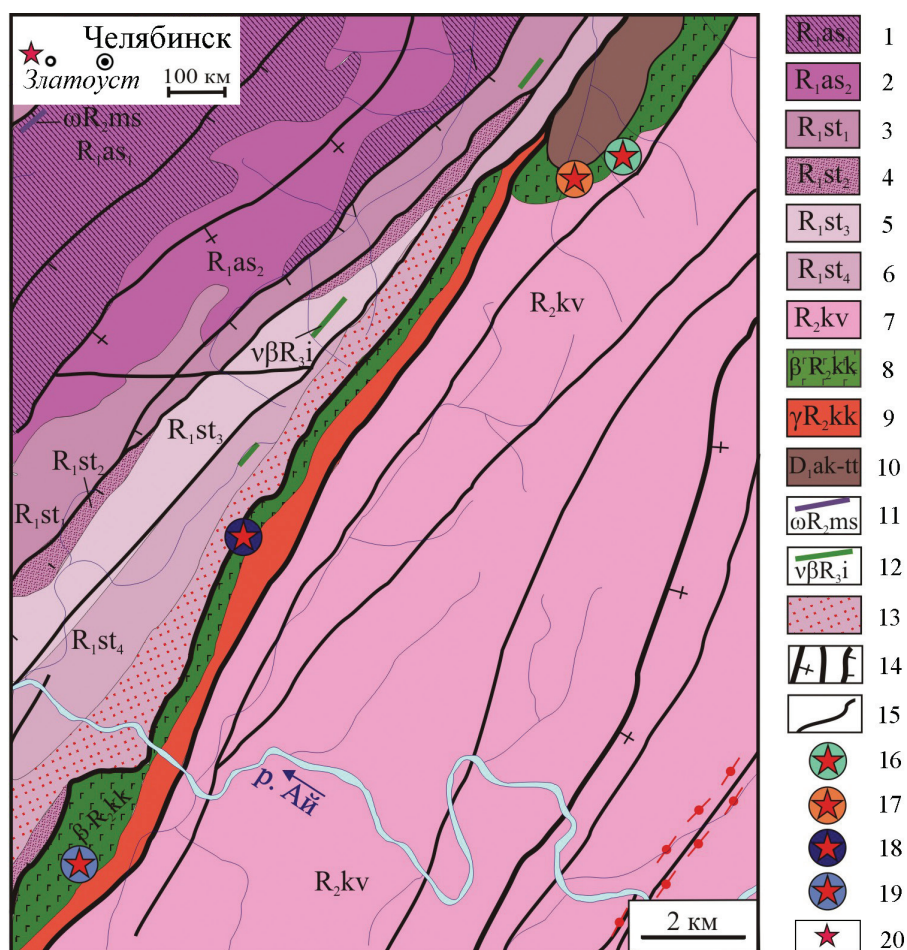


Рис. 1. Геологическая позиция минеральных копей Шишимских и Назямских гор в породах кусинско-копанского комплекса (по: [3]).

1–2 – отложения айской свиты: 1 – песчаники, алевролиты, базальты, 2 – песчаники аркозовые и доломиты песчанистые; 3–6 – отложения саткинской свиты: 3 – доломиты глинистые песчанистые, 4 – доломиты глинистые, нередко фосфатоносные, 5 – сланцы глинистые, 6 – доломиты, доломиты песчанистые и глинистые; 7 – метаморфизованные породы кувашской свиты; 8 – Кусинско–Копанский габбровый интрузив; 9 – Рябиновский гранитовый интрузив; 10 – доломиты, известняки, глинистые сланцы; 11 – дайки пикритов; 12 – дайки габбро-долеритов; 13 – зоны ороговикования; 14 – крупные разрывные нарушения; 15 – разломы; 16–19 – копи: 16 – Николае–Максимилиановская, 17 – Ахматовская, 18 – Перовскитовые, 19 – Шишимская; 20 – расположение Кусинско-Копанского клинопироксенит-габбрового интрузива (на врезке).

Fig.1. Geological position of mineral mines of the Shishim and Nazyam Mountains in the rocks of the Kusa-Kopanka complex.

1–2 – rocks of the Ai Formation: 1 – sandstones, siltstones, basalts; 2 – arkose sandstones, sandy dolomites; 3–6 – rocks of the Satka Formation: 3 – sandy clayey dolomites, 4 – clayey often P-bearing dolomites, 5 – clayey shales, 6 – dolomites, sandy clayey dolomites; 7 – metamorphosed rocks of the Kuvash Formation; 8 – Kusa-Kopanka gabbro intrusion; 9 – Ryabinovy granitic intrusion; 10 – dolomites, limestones, shales; 11 – picrite dikes; 12 – gabbro-dolerite dikes; 13 – hornfels zones; 14 – large faults; 15 – faults; 16–19 – mines: 16 – Nicholae-Maksimilianovskaya, 17 – Akhmatovskaya, – Perovskitovaya, 19 – Shishim, 20 – position of the Kusa-Kopanka clinopyroxenite-gabbroic intrusion.

связаны три крупных титаномагнетитовых месторождения: Кусинское, Медведёвское и Копанское. Кусинское месторождение, залегавшее в высокометаморфизованных габброидах, уже отработано. Руды этого месторождения характеризовались высоким качеством. Южные месторождения – Медве-

дёвское и Копанское – залегают в слабо метаморфизованных амфиболовых габбро. Титаномагнетитовые руды этих месторождений характеризуются тонкокристаллическими сростаниями ильменита, магнетита и шпинелидов, что значительно осложняет их обогащение.

Минеральные копи расположены непосредственно в контуре клинопироксенит-габбрового интрузива, тяготея к его осевой части. Общей особенностью копей является присутствие довольно крупных штокообразных тел крупно- и гигантокристаллических кальцитовых пород с разнообразной акцессорной минерализацией (хлоритовой, перовскитовой, магнетитовой, клиногумитовой). Преимущественно вокруг этих тел габброиды в значительной мере метасоматически преобразованы с формированием гранатовых, гранат-эпидотовых, везувиан-гранатовых и монтичеллит-гранатовых скарнов.

Исключение из общей закономерности составляет Перовскитовая копь. Она располагается в зоне развития доломитов саткинской свиты на участке, где габброиды Кусинско-Копанского интрузива не выходят на дневную поверхность. В пределах копи горными выработками вскрыто тело среднекрупнокристаллических минерализованных кальцитовых пород (рис. 2). К сожалению, в связи с широким развитием перекрывающих отложений, не удалось установить характер взаимоотношений минерализованных кальцитовых пород с метаморфизованными доломитами саткинской свиты. В минерализованных кальцитовых породах расположены многочисленные жильные образования хлорит-серпентинового, серпентинового и хлори-

тового состава. Они имеют среднюю мощность 1.5–1.7 м и по простиранию прослежены на расстояние не более 30 м с постепенным выклиниванием. Именно с телами хлорит-серпентинового, серпентинового или хлоритового состава пространственно связана друзовая перовскит-магнетит-клинохлоровая минерализация жильных тел, выполненных гигантокристаллическим агрегатом кальцита.

По данным документации выработок Перовскитовой копи, тела хлоритовых, серпентин-хлоритовых и серпентиновых пород с широкими вариациями содержаний главных породообразующих минералов имеют довольно сложное строение (рис. 3). В пределах этих тел широко развиты гигантокристаллические кальцитовые жилы мощностью до 0.3–0.5 м (см. рис. 3а), характеризующиеся многочисленными выклиниваниями и пережимами. Жилы по особенностям своего строения напоминают классические полосовые или лестничные жилы. Для серпентиновых и серпентин-хлоритовых пород характерно образование отдельных будин размером от 0.3 до 0.7 м (см. рис. 3б). В случае проявления будинажа серпентин-хлоритовых пород, развитие гигантокристаллических кальцитовых пород контролируется границами крупных будин. Во многих случаях, особенно при расположении крупно- и гигантокристаллических кальцитовых жил в хлоритовой или серпентин-хлоритовой

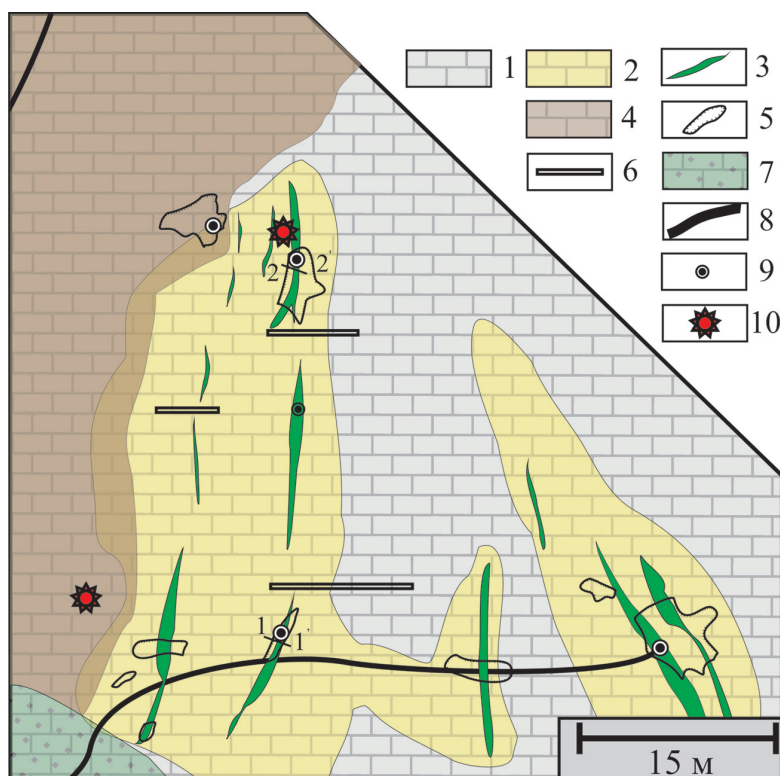


Рис. 2. Геологическая схема участка Перовскитовых копей.

1 – мелко-среднезернистые кальцитовые породы; 2 – средне-крупнозернистые кальцитовые породы с магнетитом, хлоритом, клиногумитом и перовскитом; 3 – жилы серпентин-хлоритовые; 4 – делювиальные глины; 5 – крупные выработки; 6 – канавы; 7 – вырубка; 8 – лесные дороги; 9 – точки отбора образцов; 10 – организованные лагеря. 1–1' и 2–2' – линии разрезов.

Fig. 2. Geological scheme of the Perovskitvaya mines.

1 – fine- to medium-grained calcite rocks; 2 – medium- to large-grained calcite rocks with magnetite, chlorite, perovskite and clinohumite; 3 – serpentine-chlorite veins; 4 – deluvial clays; 5 – large mine; 6 – trenches; 7 – cutting area; 8 – forest roads; 9 – sampling points; 10 – organized camps. 1–1' and 2–2' – cross-section lines.

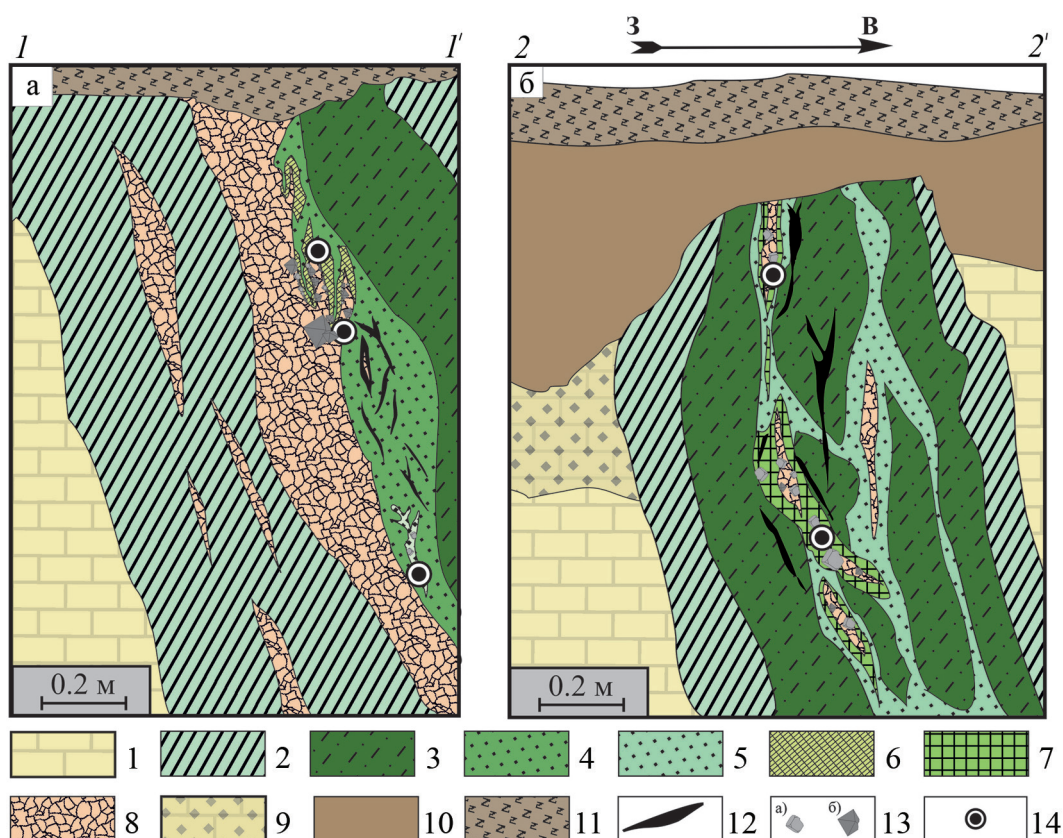


Рис. 3. Разрезы тел с перовскитом (см. рис. 2).

1–5 – породы: 1 – мраморовидная кальцитовая с магнетитом, хлоритом, клиногумитом и перовскитом; 2 – преимущественно серпентиновая, 3 – серпентин-хлоритовая, 4 – хлоритовая, 5 – офит-хлоритовая; 6–8 – жильные агрегаты: 6 – клинохлор-магнетитовый крупнозернистый, 7 – преимущественно хлоритовый крупнозернистый, 8 – кальцитовый крупнокристаллический; 9 – «мраморы» выветрелые; 10 – глины делювиальные; 11 – почвенный слой; 12 – магнетитовые жилы; 13 – находки крупных кристаллов перовскита и магнетита; 14 – точки отбора проб.

Fig. 3. Cross-sections of ore bodies with perovskite (see Fig. 2).

1–5 – rocks: 1 – marble-like calcite rock with magnetite, chlorite, clinohumite and perovskite; 2 – mostly serpentine rock; 3 – serpentine-chlorite rock; 4 – chlorite rock; 5 – ophite-chlorite rock; 6–8 – vein aggregates: 6 – clinocllore-magnetite large-grained, 7 – mostly chlorite large-grained, 8 – calcite coarse-crystalline; 9 – weathered «marbles»; 10 – deluvial clays; 11 – soil; 12 – magnetite veins; 13 – finding of large crystals of perovskite and magnetite; 14 – sampling points.

породе, в их призальбандовой части отмечается развитие крупнокристаллического агрегата клинохлора, переходящего в друзовый агрегат свободного роста с крупными кристаллами перовскита и магнетита. Относительно редко в выработках Перовскитовой копи встречаются кальцитовые жилы с диопсидовой минерализацией. В ряде жил проявлено значительное развитие клиногумитовой и клиногумит-магнетитовой минерализации.

Парагенезисы и особенности габитуса кристаллов перовскита

В хлоритовых и серпентин-хлоритовых телах Перовскитовых копей перовскит наиболее часто встречается в двух парагенезисах. Первый – пе-

ровскит-магнетит-клинохлор-кальцитовый парагенезис – локализован преимущественно в хлоритовых и серпентин-хлоритовых породах. В них в призальбандовой части гигантокристаллических кальцитовых тел наблюдается развитие друзовых агрегатов клинохлора, магнетита и перовскита. Клинохлор обнаруживается в виде хорошо ограниченных индивидов таблитчатого, реже – призматического облика (рис. 4а). Для магнетита характерно ограничение с преобладанием октаэдра (см. рис. 4б), и относительно редко встречаются ромбододэкаэдрические кристаллы (см. рис. 4в). Кристаллы перовскита имеют преобладающий кубический габитус (см. рис. 4г–е), часто с хорошо выраженной комбинационной штриховкой на гранях. На кристаллах перовскита встречаются участки индукци-

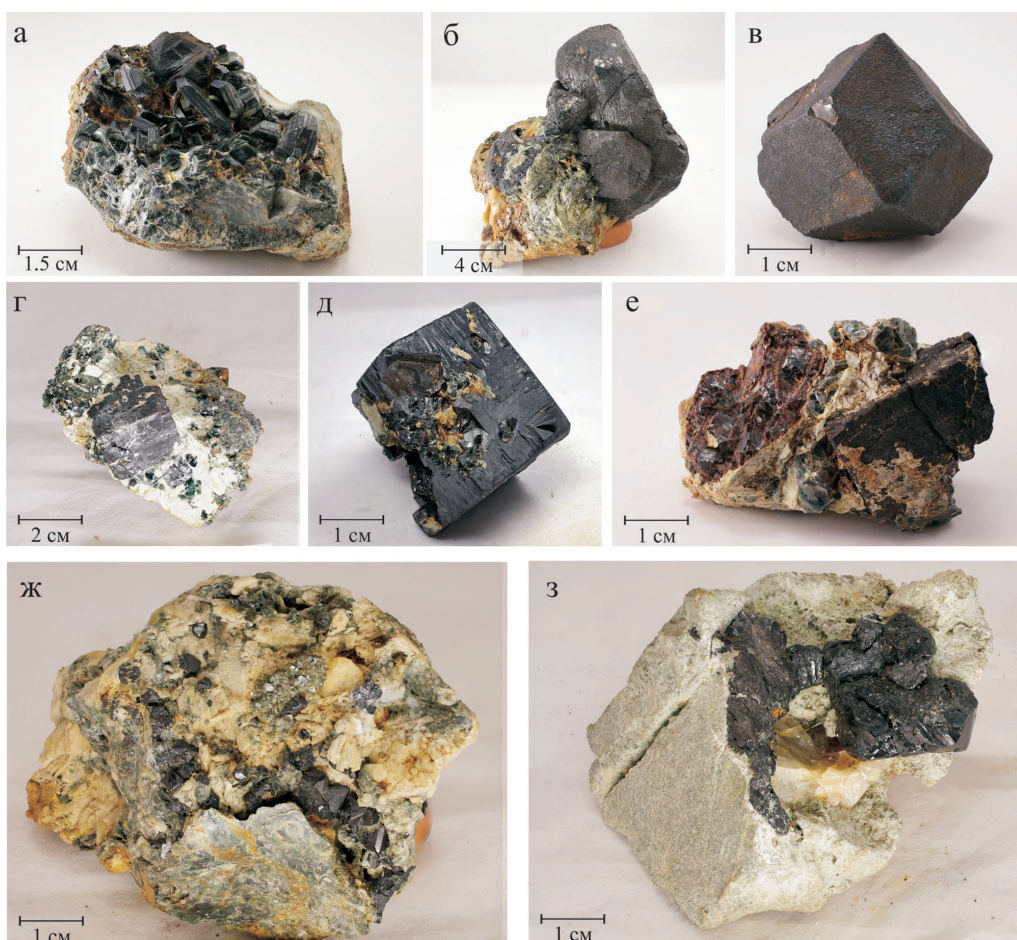


Рис. 4. Преобладающие минералы Перовскитовой копи.

а – друза кристаллов клинохлора; б – магнетит {111} с хлоритом; в – магнетит {110}; г – перовскит {100} с клинохлором в серпентиновой породе, д – перовскит {100} с вростками клинохлора, е – клиногумит и перовскит в серпентине, ж – диопсидовый прожилок с октаэдрами перовскита в серпентин-хлоритовой породе, з – перовскит {100} с развитием тетрагексаэдра в диопсид-хлоритовой породе.

Fig. 4. Major minerals of the Perovskitovaya mine.

а – druze of clinocllore crystals; б – magnetite crystal {111} with chlorite; в – magnetite crystal {110}; г – perovskite crystal {100} with clinocllore in serpentine rock; д – perovskite crystal {100} with clinocllore ingrowths; е – clinohumite and perovskite crystals in serpentine; ж – diopside veinlet with octahedral perovskite crystals {111} in serpentine-chlorite rock; з – perovskite crystal {100}, locally, of tetrahedral morphology, in diopside-chlorite rock.

онных поверхностей совместного роста с магнетитом и клинохлором (см. рис. 4д), а также и с кальцитом; относительно редко перовскит встречается совместно с клиногумитом (см. рис. 4е).

Минералы второго парагенезиса – перовскит-магнетит-диопсид-клинохлор-кальцитового – выполняют прожилки в хлоритовых породах с повышенным содержанием диопсида. Среди кристаллов перовскита из прожилков выделяются две габитусные разновидности. Наиболее распространены октаэдрические кристаллы величиной до 8 мм (см. рис. 4ж). Реже встречаются кристаллы до 2 см с габитусными формами {540} и {230} (см. рис 4з) при меньшем развитии граней других простых форм,

обычно представленных {100} и {111}. Для перовскита этих морфологических типов были отмечены поверхности совместного роста с диопсидом, магнетитом и кальцитом.

Элементы-примеси в составе перовскитов

Изучение химического состава и микропримесей производилось в кристаллах перовскита кубического, октаэдрического и тетрагексаэдрического габитусов из крупнозернистых кальцитовых тел Перовскитовых копей (рис. 5), а также проанализирован розовато-коричневато-фиолетовый перовскит из везувиан-гранатовых скарнов Ахматовской

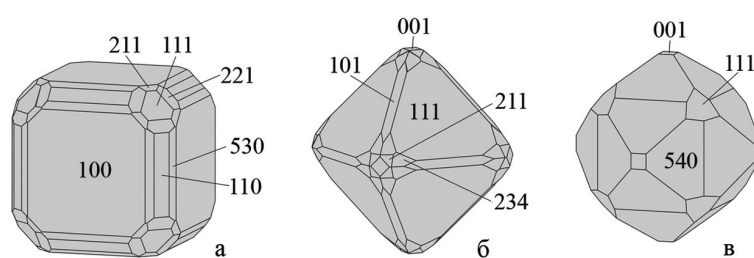


Рис. 5. Форма кристаллов перовскита Перовскитовой копи.

Fig. 5. Morphology of perovskite crystals from Perovskitovaya mine.

копи, отмечавшийся ранее [6, 8]. Характер генетических взаимоотношений индивидов перовскитов с другими минералами в крупнокристаллических кальцитовых телах указывает на их совместную кристаллизацию, особенно на заключительных стадиях роста. Взаимоотношения индивидов перовскита с индивидами силикатных минералов в скарнах свидетельствуют об образовании его совместно с силикатной составляющей при формировании метасоматического агрегата. Различия в условиях формирования индивидов и агрегатов перовскитов отразились на уровне накопления и характере распределения элементов-примесей.

Рентгеноспектральным микроанализом перовскитов из разных копей и парагенезисов выявлено практически полное соответствие их основного состава формуле CaTiO_3 вне зависимости от морфологических типов или каких-либо иных особенностей. Только лишь в некоторых случаях отмечена незначительная примесь оксида железа, не превосходящая 0.67 мас. % при среднем значении 0.37 мас. %. В розовато-фиолетовом («сиреневом») перовските из прожилка в везувиан-гранатовых породах Ахматовской копи примеси нами не обнаружены, но ранее в нём указывались примеси FeO до 0.14 мас. % и MgO до 0.2 мас. % [8]. Стоит отметить, что с использованием рентгеноспектрального микроанализа не удалось выявить зональность и уловить вариации составов индивидов минералов в зависимости от кристаллографических направлений.

Дополнительное исследование содержания микропримесей на 48 элементов, включая РЗЭ (см. таблицу), выполнено нами в 4-х кристаллах перовскита разного габитуса: октаэдрического и тетрагексаэдрического габитуса из перовскит-магнетит-диопсид-клинохлор-кальцитового парагенезиса (условно «высокотемпературного»); перовскита кубического габитуса из перовскит-магнетит-клинохлор-кальцитового парагенезиса (условно «низкотемпературного») и зернистый агрегат перовскита из везувиан-гранатовой породы.

В целом, для распределения микропримесей в кристаллах отмечаются следующие закономерности. Наиболее отчётливо фиксируется пониженное содержание элементов группы железа в кристаллах перовскита раннего («высокотемпературного») парагенезиса, по сравнению с кристаллами позднего («низкотемпературного»). Такого же рода зависимость отмечается и для распределения Zr и Nb. В редких случаях встречаются зональные индивиды перовскита кубического габитуса с просвечивающими тёмно-коричневыми или фиолетово-коричневыми краевыми зонами, обогащёнными Nb. Для U, Th, Y и Sr наблюдается обратная закономерность: большее количество этих элементов содержится в кристаллах с габитусными формами {111}, {540} и {230}, а пониженное содержание фиксируется в кристаллах с ограничением в форме куба и зёрен из везувиан-гранатового агрегата. При статистической обработке данных отмечается сильная положительная корреляция между Sr и лёгкими РЗЭ, а также между Y и тяжёлыми РЗЭ. В индивидах содержание лёгких редких земель значительно выше, чем тяжёлых. Наиболее обогащены редкоземельными элементами перовскиты «высокотемпературной» ассоциации, а перовскиты из «низкотемпературной» ассоциации характеризуются более низкими содержаниями РЗЭ и других элементов-примесей.

Для оценки близости условий образования перовскитов в различных геологических условиях произведён сравнительный анализ распределения редкоземельных элементов (рис. 6) в перовските из пород копей Чернореченских и Назямских гор, карбонатитов Кольского полуострова [10] и кимберлитовых трубок провинций Чикен парк (Колорадо, США), трубки Удачная (Якутия) [11] и Куруман (Южная Африка) [13]. Для перовскитов из скарнов Ахматовской копи отмечается пониженная концентрация редкоземельных элементов (см. таблицу и рис. 6). Отличительной особенностью характера распределения РЗЭ в минерале является

Таблица

**Содержание редких и редкоземельных элементов в перовскитах из копей
Чернореченских и Назямских гор (среднее из 5 анализов, ppm)**

Table

**Contents of rare and rare earth elements in perovskite from mines of the
Chernaya Rechka and Nazyam Mountains (average on 5 analyses, ppm)**

Элементы	Перовскитовые копи (Чернореченский хребет)			Ахматовская копь (Назымский хребет)
	Высокотемпературный парагенезис		Низкотемпературный парагенезис	
	Габитусная форма			Зёрна в везувиан- гранатовом скарне
	{540}	{111}	{100}	
La	3563	2140	602	149
Ce	4943	3086	1446	148
Pr	691	485	270	15.5
Nd	2500	1993	1286	49.2
Sm	469	474	350	6.98
Eu	164	150	115	4.10
Gd	362	465	271	3.18
Tb	49.5	76.9	37.0	0.41
Dy	227	410	165	1.14
Ho	42.4	90.5	29.3	0.37
Er	78.2	192	51.0	0.56
Tm	7.30	22.8	5.72	0.16
Yb	37.4	102	23.5	0.63
Lu	3.01	11.3	2.68	0.15
ΣРЗЭ	13137	9698	4654	379
Sr	61.9	73.3	26.2	24.5
Y	2333	981	555	4.59
Zr	39.8	35.0	50.1	312
Nb	129	375	524	167
Th	253	345	74.1	0.61
U	153.7	268	51.7	1.40

Примечание. ЛА-ИСП-МС анализ (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, аналитик В.А. Шишлов).

Note. LA-ICP-MS analysis (VSEGEI, St-Petersburg, analyst V.A. Shishlov).

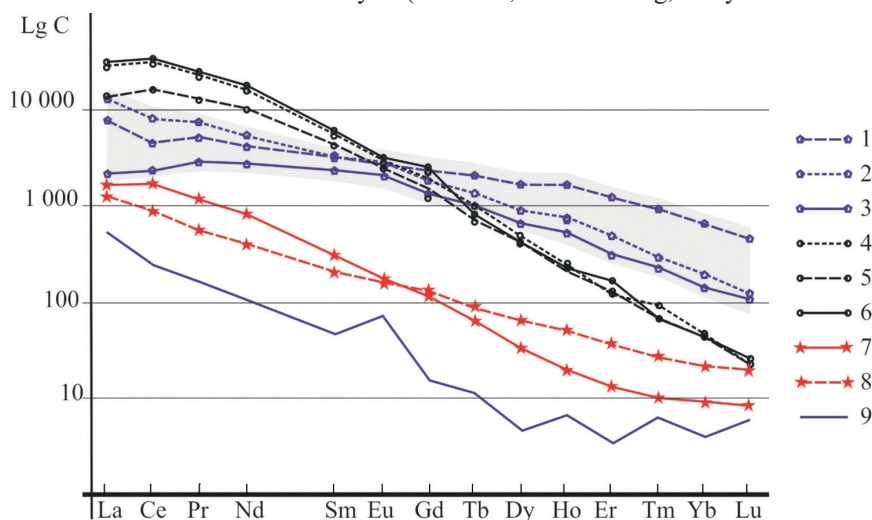


Рис. 6. Спектры РЗЭ перовскита из различных пород, нормированные на хондрит [12].

1–3 – кристаллы перовскита разной формы из Перовскитовой копи: 1 – {540}+{230}, 2 – {111}, 3 – {100}; 4–6 – из кимберлитов: 4 – Курумман, Южная Африка [11], 5 – Чикен парк, Колорадо, США [13], 6 – трубка Удачная, Россия [13]; 7–8 – из карбонатитов Африканды, Кольский полуостров [10]; 9 – из везувиан-гранатовых пород Ахматовской копи.

Fig. 6. Chondrite-normalized [12] REE spectra of perovskite crystals from various rocks.

1–3 – perovskite crystals of various morphology from Perovskitovaya mine: 1 – {540}+{230}, 2 – {111}, 3 – {100}; 4–6 – perovskite from kimberlites: 4 – Kuruman, South Africa [11], 5 – Chicken Park, Colorado, USA [13], 6 – Udachnaya pipe, Russia [13]; 7–8 – perovskite from Afrikanda carbonatites, Kola Peninsula [10]; 9 – perovskite from garnet-vesuvianite rocks of the Akhmatovskaya mine.

ся положительная E_u аномалия, что нехарактерно для перовскитов из остальных парагенезисов. Для индивидов перовскита из копей Чернореченских и Назямских гор отмечается преобладание лёгких РЗЭ над тяжёлыми. Содержание РЗЭ понижается от перовскита с габитусной формой {540} («высокотемпературного» парагенезиса) к кристаллу с преобладанием {100}, нередко сдвойнированному и с комбинационной штриховкой на гранях («низкотемпературного» парагенезиса).

Весьма близок характер распределения РЗЭ в перовскитах из копей Чернореченских гор и перовскитах из карбонатитов массива Африканда на Кольском полуострове [10]; также незначительно отличаются и перовскиты из кимберлитов, для которых в большей степени выражено преобладание лёгких РЗЭ над тяжёлыми.

Обсуждение результатов и выводы

Различия характера распределения редкоземельных элементов в перовскитах из скарнов Ахматовской копи и перовскитов из кальцитовых полостей копей Чернореченских гор указывает на различные процессы формирования минерала. Образование перовскита в скарнах Ахматовской копи происходило метасоматическим путём, а кристаллы перовскита в кальцитовых полостях формировались в ходе свободной кристаллизации, вероятно, из карбонатитового расплава. Схожесть распределения и содержаний РЗЭ в перовскитах из кимберлитов и карбонатитов с перовскитами из кальцитовых полостей копей Чернореченского хребта свидетельствует, скорее всего, о близких условиях их образования. Для выделенных парагенезисов перовскита на основе морфологических особенностей и генетических взаимоотношений минералов наблюдается корреляция формы кристаллов с содержанием в них редких земель. Предполагается, что смена преобладания кристаллов простых форм от {540} через {111} к {100}, возможно, указывает на уменьшение температуры кристаллизации, что влечёт за собой снижение возможности встраиваться в структуру минерала изоморфных примесей, в том числе Y и Sr . Вследствие прямой корреляции между Y и тяжёлыми РЗЭ, а также Sr и лёгкими РЗЭ, наблюдается снижение содержания РЗЭ в перовските при переходе от «высокотемпературных» образований к «низкотемпературным». Необходимо отметить также, что пирамиды нарастания разных простых форм в индивидах, по-видимому, облада-

ют различной способностью захвата примесей. Перовскиты октаэдрического габитуса, например, по сравнению с индивидами, обладающими иным габитусом, значительно обогащены тяжёлыми редкоземельными элементами относительно лёгких. Однако аналитические возможности не позволили выявить зональность и секториальность в кристаллах, чтобы достоверно интерпретировать распределение микропримесей с учётом анатомии индивидов.

Литература

1. Белковский А.И., Локтина И.Н., Нестеров А.Р. (1998). Минеральные копи Шишимских-Назямских гор: предкарбонатитовые скарны и ранние (безрудные) карбонатиты. Проблемы петрогенезиса и рудообразования. Тез. докл. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 12–14.
2. Варлаков А.С. (1959). Монтичеллитовая порода из Ахматовской копи. *Записки ВМО*. 5, 594–597.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:200000 (второе поколение). Серия Уральская. N-40-ХП (Златоуст): Объяснительная записка (2002). Аулов Б.Н., Владимирцева Ю.А., Гвоздик Н.И., Королькова З.Г. и др. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 364 с.
4. Еремев П.В. (1899). Перовскит из Чувашской горы в Златоустовском округе на Урале. *Записки Импер. СПб минералог. об-ва*. 36(1), 117.
5. Мясников В.С. (1954). Минеральные копи Шишимских и Назямских гор. *Минералогия Урала*, 1. М.: АН СССР, 250–268.
6. Попов В.А. (2000). Кристалломорфологические этюды в Ахматовской копи. *Минералогия и жизнь: биоминеральные гомологии*. Сыктывкар: Геопринт, 227–228.
7. Попов В.А. (2010). Минералогические исследования скарнов и карбонатитов Ахматовской копи. *Уральский минералогический сборник № 17*. 109–117.
8. Попов В.А. (2012). Ахматовская копь на Южном Урале (очерк минералогии). *Минералогический альманах*. М: ООО «Минерал-альманах». 17(1), 8–46.
9. Попов В.А., Макагонов Е.П., Никандров С.Н. (1998). О новых проявлениях карбонатитов на Урале. *Уральский минералогический сборник № 8*. Миасс: ИМин УрО РАН, 240–248.
10. Arzamastsev A.A., Bea F., Arzamastseva L.V., and Montero P. (2002). Rare earth elements in rocks

and minerals from alkaline plutons of the Kola Peninsula, NW Russia, as indicators of alkaline magma evolution. *Russian Journal of Earth Sciences*, 4(3). 187–209.

11. Donnelly C.L., William L.G., Griffin W.L., Yang J.-H., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Li X.-H. (2001). In situ U-Pb Dating and Sr-Nd Isotopic Analysis of Perovskite: Constraints on the Age and Petrogenesis of the Kuruman Kimberlite Province, Kaapvaal Craton, South Africa. *Journal of Petrology*, 53(12). 2497–2522.

12. McDonough W.F., Sun S.-S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120. 223–253.

13. Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Kamenetsky V.S., Sharygin V.V., Golovin A.V. (2013). Trace-element partitioning in perovskite: Implications for the geochemistry of kimberlites and other mantle-derived undersaturated rocks. *Chemical Geology*, 353, 112–131.

14. Rose G. (1839). De novis quibusdam fossilibus, quae in montibus uraliis inveniuntur, scripsit. *Ann. Phys.* Berlin, 48, 558.

Поступила в редакцию 6 марта 2017 г.