

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.05>© Почетный член Э. М. СПИРИДОНОВ, д. чл. С. В. ФИЛИМОНОВ,
Е. С. СЕМИКОЛЕННЫХ, Н. Н. КОРОТАЕВА, д. чл. Н. Н. КРИВИЦКАЯЧЕВКИНИТ-(Ce) И ПЕРРЬЕРИТ-(Ce) ИЗ ОСТРОВОДУЖНЫХ
КВАРЦЕВЫХ ГАББРО-НОРИТ-ДОЛЕРИТОВ ИНТРУЗИВА АЮ-ДАГ,
ГОРНЫЙ КРЫММосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Воробьевы горы, 1;
e-mail: nnkriv@mail.ru

Установлен на первый взгляд парадоксальный факт — чевкинит-(Ce) и перрьерит-(Ce) — характерные минералы щелочных магматических горных пород и высокотемпературных щелочных метасоматитов, являются типичными акцессорными минералами островодужных габброидов в мезозоидах Горного Крыма. Раннемагматические минеральные ассоциации этих низкощелочных габброидов интрузива Аю-Даг включают недосыщенные кремнеземом акцессорные минералы Ti—Zr—LREE: чевкинит-(Ce), перрьерит-(Ce), цирконолит, баделлит. Чевкинит и перрьерит слагают обособленные коротко-призматические кристаллы размером до 0.1 мм, а также сильно корродированные включения в центре кристаллов позднемагматического алланита-(Ce). Оба минерала — одни из главных концентраторов и носителей лантанидов в габброидах Аю-Дага. Распределение лантанидов в чевкините и перрьерите — $Ce \gg La > Nd \gg Pr > Gd, Sm, Tb, Dy$. Количественный состав лантанидов в чевкините и в перрьерите идентичен: Ce (54—58 % REE) — La (25—31 %) — Nd (12—20 %). Содержания Zr, Th, Y, Sc в обоих полиморфах в габброидах Аю-Дага идентичны. Чевкинит-(Ce), встречающийся в виде обособленных кристаллов — магний-доминантный, его состав — $[Ce_{1.5}La_{0.8-0.9}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1}(Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1}Y_{0.2}Sc_{0.1} \times Ca_{0.7-0.8}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})_1(Fe^{3+}_{1.1-1.2}Ti_{0.4-0.7}Zr_{0.1-0.2}Al_{0.1-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.7-4}Al_{0.3-0.4})_4O_{22}]$. Чевкинит-(Ce) из включений в алланите беден Mg, его состав — $[Ce_{1.5-1.7}La_{0.6-0.9}Nd_{0.5-0.6}Pr_{0.1}(Gd+Sm)_{0.1}Y_{0.1-0.2} \times Sc_{0.1}Ca_{0.6-0.8}Na_{0.1}]_4(Fe^{2+}_{0.6-1}Mg_{0-0.1}Fe^{3+}_{0-0.4})_1(Ti_{0.8-0.9}Fe^{3+}_{0.3-0.7}Al_{0.2-0.4}Zr_{0-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})_4O_{22}]$. Перрьерит-(Ce), слагающий идиоморфные кристаллы, — магний-доминантный, его состав — $[Ce_{1.2-1.6}La_{0.6-0.8}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1}(Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1}Y_{0.1}Sc_{0.1}Ca_{1.0-1.1}Sr_{0-0.1}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.9-1}Fe^{3+}_{0.1-0.1})_1 \times (Fe^{3+}_{1.0-1.2}Al_{0.2-0.7}Ti_{0.3-0.5}Zr_{0-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})(O_{21.3-21.5}OH_{0.7-0.5})_{22}]$. Перрьерит-(Ce) включений в алланите беден Mg, его состав — $[Ce_{1.3-1.5}La_{0.7-0.8}Nd_{0.3-0.5}Pr_{0.1}(Gd+Sm)_{0.1}Y_{0.1}Sc_{0.1}Ca_{1.1-1.3}Na_{0.1}]_4 \times (Fe^{2+}_{0.4-0.5}Fe^{3+}_{0.2-0.4}Mg_{0.2})_1(Al_{0.5-0.7}Ti_{0.3-0.8}Fe^{3+}_{0.3-0.9}Zr_{0.1-0.3})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})(O_{21.4-22}OH_{0.6-0.6})_{22}]$.

Наличие чевкинита и перрьерита, как и цирконолита, в нетипичной геохимической обстановке, возможно, объясняется слабым развитием позднемагматических процессов в мало глубинных и бедных флюидами интрузивах габброидов в мезозоидах Горного Крыма.

Ключевые слова: чевкинит-(Ce), перрьерит-(Ce), габбро-норит-долериты, Аю-Даг, Горный Крым.

E. M. SPIRIDONOV, S. V. FILIMONOV, E. S. SEMIKOLENNYKH, N. N. KOROTAYEVA, N. N. KRIVITSKAYA. CHEVKINITE-(Ce) AND PERRIERITE-(Ce) IN THE ISLAND ARC QUARTZ GABBRO-NORITE-DOLERITES OF THE AYU-DAG INTRUSION, ROCKY CRIMEA

Moscow State University, Moscow, Russia

Chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce) are minerals characteristic for alkaline magmatic rocks and high-temperature alkaline metasomatites, and yet they are typical accessory minerals in Me-

sozoic island-arc gabbroids of the Rocky Crimea. Early magmatic mineral associations in these low-alkaline rocks of Ayu-Dag intrusion include accessory Ti—Zr—LREE minerals under-saturated in silica: chevkinite-(Ce), perrierite-(Ce), zirconolite, baddeleyite. Chevkinite and perrierite occur as isolated shortly prismatic crystals up to 0.1 mm in size and strongly corroded inclusions in center of late-magmatic allanite-(Ce) crystals. Both minerals are the main concentrators of lanthanides in Ayu-Dag gabbroids. Distribution of lanthanides in them is as following: Ce >> La > Nd >> Pr > Gd, Sm, Tb, Dy. Contents of lanthanides in chevkinite and perrierite are identical: Ce (54—58 % REE) — La (25—31 %) — Nd (12—20 %). Contents of Zr, Th, Y, Sc in both polymorphs are identical also. Chevkinite-(Ce) of isolated crystals is magnesium-dominant; its composition is: $[Ce_{1.5}La_{0.8-0.9}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1}(Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1}Y_{0.2}Sc_{0.1}Ca_{0.7-0.8}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})_1 \times (Fe^{3+}_{1.1-1.2}Ti_{0.4-0.7}Zr_{0.1-0.2}Al_{0.1-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.7-4}Al_{0.3-0.4})_4O_{22}]$. Chevkinite-(Ce) from inclusions in allanite is poor in Mg, its formula is: $[Ce_{1.5-1.7}La_{0.6-0.9}Nd_{0.5-0.6}Pr_{0.1}(Gd+Sm)_{0.1}Y_{0.1-0.2}Sc_{0.1}Ca_{0.6-0.8}Na_{0.1}]_4 \times (Fe^{2+}_{0.6-1}Mg_{0-0.1}Fe^{3+}_{0-0.4})(Ti_{0.8-0.9}Fe^{3+}_{0.3-0.7}Al_{0.2-0.4}Zr_{0-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})_4O_{22}]$. Perrierite-(Ce) composing idiomorphic crystals is magnesium-dominant, its composition is: $[Ce_{1.2-1.6}La_{0.6-0.8}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1} \times (Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1}Y_{0.1}Sc_{0.1}Ca_{1.0-1.1}Sr_{0-0.1}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.9-1}Fe^{3+}_{0.1-0.1})(Fe^{3+}_{1.0-1.2}Al_{0.2-0.7}Ti_{0.3-0.5}Zr_{0-0.2})_2Ti_2 \times [(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})(O_{21.3-21.5}OH_{0.7-0.5})_{22}]$. Perrierite-(Ce) occurring inside allanite is poor in Mg, with the formula: $[Ce_{1.3-1.5}La_{0.7-0.8}Nd_{0.3-0.5}Pr_{0.1}(Gd+Sm)_{0.1}Y_{0.1}Sc_{0.1}Ca_{1.1-1.3}Na_{0.1}]_4(Fe^{2+}_{0.4-0.5}Fe^{3+}_{0.2-0.4}Mg_{0.2})_1 \times (Al_{0.5-0.7}Ti_{0.3-0.8}Fe^{3+}_{0.3-0.9}Zr_{0.1-0.3})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0.4})(O_{21.4-22}OH_{0.6-0.6})_{22}]$. Presence of chevkinite, perrierite and zirconolite in unusual geochemical settings may be explained perhaps by poor development of late-magmatic processes in near-surface intrusions of Crimea's Mesozooids.

Key words: chevkinite-(Ce), perrierite-(Ce), gabbro-norite-dolerite, Ayu-Dag, Rocky Crimea.

ВВЕДЕНИЕ

Акцессорные минералы магматических горных пород — индикаторы петрогенеза, нередко более информативны, чем породообразующие. Для мезозойских магматических горных пород Крыма они кратко охарактеризованы в работах (Лагорио, 1887; Мейстер, 1908; Попов, 1938; Лучицкий, 1939; Муратов, 1973; Спиридонов и др., 1990). Относительно детально изучены акцессорные циркон, торит, бадделеит и цирконолит кварцевых габброидов Аю-Дага (Спиридонов и др., 2016, 2018). Данная статья содержит результаты исследования акцессорных чевкинита и перрьерита Аю-Дага — характерных минералов островодужных габброидов Первомайско-Аюдагского интрузивного комплекса.

ЧЕВКИНИТ И ПЕРРЬЕРИТ

Чевкинит, как особый минеральный вид, был установлен в пегматоидных сиенитоподобных породах среди фенитового ореола вокруг Ильменогорского плутона нефелиновых сиенитов в 1839 г. Минерал назван в честь начальника штаба Корпуса горных инженеров Петербурга К. В. Чевкина (1802—1875) (Крыжановский, 1924). Диморф чевкинита — перрьерит открыт и изучен позднее (Bonatti, Gottardi, 1954; Bonatti, 1959; Ito, Arem, 1971).

Чевкинит и перрьерит $(Ce,La,Nd,Ca,Sr,Th,Na)_4(Fe^{2+},Mg,Mn^{2+})_1(Fe^{3+},Ti,Al,Zr,Nb)_2 \times Ti_2[O_4(Si_2O_7)_2]_2$ — бедные кремнеземом оксиды — диортосиликаты лантанидов цериевой группы, титана, железа, кальция, алюминия, магния (Крыжановский, 1924; Болдырев и др., 1938; Барсанов, 1949; Геохимия..., 1964; Bonatti, 1959; Segalstad, Larsen, 1978; Macdonald, Belkin, 2002; Sokolova et al., 2004). В подавляющем большинстве образцов чевкинита и перрьерита из лантанидов преобладает церий, изредка — лантан. Не столь редко часть кальция (реже весь кальций) замещена стронцием. Отдельные образцы чевкинита весьма богаты торием, до 21 мас. % (Kaufman, Jaffe, 1946). Из двухвалентных катионов

обычно преобладает Fe, редко — Mg (Macdonald, Belkin, 2002), изредка — Mn (Haggerty, Mariano, 1983); нередко в этой позиции немало Fe³⁺. Третья кристаллохимическая позиция чаще занята Fe³⁺, Ti и Al (Macdonald, Belkin, 2002); в ряде образцов — много Fe²⁺; иные — обогащены Zr и/или Nb (Mils et al., 2012).

Моноклинные чевкинит и перрьерит трудно различать. Макроскопически и под микроскопом они идентичны. Несколько различаются их рентгенограммы, заметно отличаются параметры элементарной ячейки. Исследования Р. Макдональда с коллегами (Macdonald, Belkin, 2002; Macdonald et al., 2009, 2012) показали различия чевкинита и перрьерита по деталям химического состава: чевкинит обогащен Fe и относительно беден Ca, как правило, обогащен REE, тогда как перрьерит обогащен Ca и относительно беден Fe, обычно несколько беднее REE. По этим критериям, с определенной долей условности, ниже даны наименования кристаллам чевкинита и перрьерита из габброидов Крыма.

Чевкинит и перрьерит часто развиты в одних и тех же породах. Они — характерные минералы высокотемпературных щелочных метасоматитов — фенитов и продуктов их палингенеза (реоморфизма), сопряженных с интрузивами карбонатитов, нефелиновых сиенитов, ультраосновных-щелочных пород (Крыжановский, 1924; Болдырев и др., 1938; Барсанов, 1949; Murata et al., 1957; Хейнрих, 1962; Геохимия..., 1964; Haggerty, Mariano, 1983; Капустин, 1987; Halleran, Russell, 1996; Sokolova et al., 2004; Macdonald et al., 2012; Mils et al., 2012). Чевкинит и перрьерит — одни из типичных минералов агпаитовых магматических пород — щелочных гранитов, щелочных гранит-пегматитов, щелочных гранит-порфиоров, экеритов, граносиенитов, сиенитов, нефелиновых сиенитов, щелочных кремнекислых вулканитов; в некоторых из них чевкинит развит не только в матриксе, но и слагает вкрапленники (Lacroix, 1915; Болдырев и др., 1938; Kaufman, Jaffe, 1946; Jaffe et al., 1956; Murata et al., 1957; Young, Powers, 1960; Хейнрих, 1962; Геохимия..., 1964; Ляхович, 1967; Izett, Wilcox, 1968; Segalstad, Larsen, 1978; McDowell, 1979; Лазаренко и др., 1981; Halleran, Russell, 1996; Sørensen, 1997; Marshall et al., 1998; Scailier, Macdonald, 2001; Macdonald et al., 2002, 2013; Ridolfi et al., 2003; Troll et al., 2003; Vlach, Gualda, 2007; Carlier, Lorand, 2008; Belkin et al., 2009; Larsen et al., 2010; Papoutsis, Pe-Piper, 2013). Чевкинит и перрьерит — типичные минералы высокотемпературных агпаитовых кварц-санидин (микроклин)-альбитовых метасоматитов (апогранитов), сопряженных с интрузивами щелочных гранитов (Геохимия..., 1964; Зациха, 1972; Лазаренко и др., 1981; Ганзеев, Гречищев, 2003; Савельева, Карманов, 2008; Macdonald et al., 2012). Значительно реже чевкинит и перрьерит развиты в магматических породах умеренно щелочных и низкощелочных; обычно это закаленные магматические породы типа титанистых лунных базальтов и земных долеритов (Muhling et al., 2014).

ГЕОЛОГИЯ ГОРНОГО КРЫМА

Горный Крым — мезозойское покровно-складчатое сооружение, состоящее из северной Лозовской и южной Горно-Крымской тектонических зон. Интрузив Аю-Даг расположен в Горно-Крымской зоне. Значительную часть складчатого комплекса Горного Крыма слагают образования островодужной стадии. Это, главным образом, терригенные толщи T₂—J₁ таврической и эски-

ордынской серий, сложно дислоцированные и несогласно перекрытые J_2 угленосными конгломерато-песчано-глинистыми толщами, которые заметно дислоцированы. Терригенные толщи пересечены и контактово метаморфизованы небольшими плутонами раннебайосских кварцевых габбро-норит-долеритов и кварцевых габбро-норит-диоритов до оливковых габбро-долеритов и плагиоцерцолитов, с одной стороны, и до кварцевых диоритов, плагиогранитов и гранофировых гранитов, с другой (Лагорио, 1887; Мейстер, 1908; Попов, 1938; Лучицкий, 1939; Муратов, 1973; Спиридонов и др., 1990, 2018; Морозова и др., 2012). В. В. Плошко выделял эти магматические образования как ассоциацию пикритов и кварцевых диабазов (Плошко и др., 1979). Э. М. Спиридонов и Т. О. Фёдоров (1990) выделили их как Первомайско-Аюдагский интрузивный комплекс. К этому комплексу принадлежит большая часть интрузивов Горного Крыма. Интрузивы Первомайско-Аюдагского комплекса пересечены жерловинами и дайками базальтов и андезитов позднебайосской островодужной бодракско-карадагской вулканической серии (Спиридонов и др., 1990).

ИНТРУЗИВ АЮ-ДАГ

Одно из типичных островодужных магматических образований Горного Крыма — интрузив кварцевых габбро-норит-долеритов, габбро-норитов и габбро-норит-анортозитов, кварцевых габбро-диоритов Аю-Даг (Медведь-гора) размером $2,4 \times 2$ км. Интрузив внедрился механически активно, раздвигая и пронизывая дислоцированную толщу флиша таврической серии. Основное интрузивное тело Аю-Дага сопровождают сателлиты долготного и северо-восточного простирания, расположенные восточнее (Партенит, Медвежата). У юго-восточного контакта от основного тела в породы рамы отходят субгоризонтальные жилообразные апофизы мощностью от первых см до 15 м, сложенные мелкозернистыми порфириновидными и резко порфириновидными габброидами. Вдоль контактов жил — апофиз развиты породы зоны закалки (Спиридонов и др., 2018). Интрузив окружен узким до 5—8 м ореолом роговиков, в том числе узловатых с андалузитом, кордиеритом, пирротинном; кварцито-песчаников. Габброиды содержат ксенолиты высокотемпературных роговиков по породам таврической серии, в том числе, по кремнистым сидеритам (Ерёменко, Ерёменко, 1972; Ананьев, Ревердатто, 1997).

Для интрузивных пород Аю-Дага характерны полосчатые текстуры течения, выраженные чередованием полос, богатых плагиоклазами, и полос, богатых пироксенами и титаномагнетитом. Широко распространены массивные габброиды средне-крупнозернистые до крупнозернистых и редко пегматоидных, с одной стороны, и до мелко-среднезернистых, с другой. Не менее широко развиты такситовые и шпирово-такситовые габброиды с хаотичным чередованием разнозернистых, меланократовых, мезократовых и лейкократовых участков неправильной формы. Габброиды Аю-Дага повсеместно содержат мелкие гнезда кварца и гранофировых — микропегматитовых кварц-полевошпатовых (олигоклаз, реже — ортоклаз-микрпертит) сростаний. В отдельных участках количество и размер таких гнезд увеличивается, вплоть до преобладания. Соответственно, состав пород меняется от габбро-норитового через габбро-диориты и кварцевые диориты, до гранофировых плагиогранитов и гранитов. Очевидно, поэтому в ранних работах (Лучицкий, 1939 и др.) отмечено широкое развитие в составе интрузива Аю-Даг и его сателлитов гранито-

идных пород. Преобладание на Аю-Даге габбро-долеритов с анортитом установил С. М. Кравченко (Муратов, 1973).

Среди габброидов Аю-Дага множество короткометражных ветвящихся жил мелкозернистых кварцевых габбро-норит-диоритов, пироксен-амфибол-биотитовых кварцевых диоритов, аплитовидных гранодиоритов, которые не резко отграничены от вмещающих габбро-норитов.

Габброиды Аю-Дага пересечены многочисленными пологими, наклонными и крутопадающими дайками базитового состава с резко выраженными эндоконтактовыми зонами закалки. Эти дайки слагают долериты, микрогаббро-нориты, габбро-порфириды, двупироксеновые и амфибол-двупироксеновые, изредка оливинсодержащие долериты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

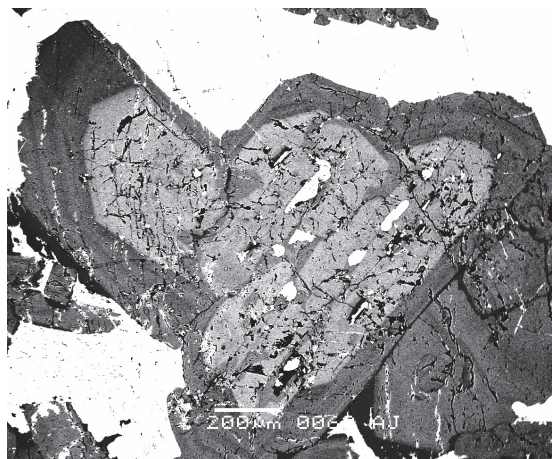
Многочисленные образцы габброидов Аю-Дага изучены авторами в шлифах и аншлифах оптически и с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV (Лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ). Методика измерений стандартная (Рид, 2008). Фотографии в режиме отраженных электронов и микронзондовые анализы минералов выполнила аналитик-исследователь Н. Н. Коротаева.

Кварцевые анортит-битовнитовые габбро-норит-долериты Аю-Дага

Это — наиболее распространенный тип горных пород Аю-Дага. Преобладающую часть их объема слагают анортит An_{92-90} (с включениями магнезиальных авгита и субкальциевого авгита, железистого бронзита) с оторочками битовнита (рис. 1), битовнит An_{79-73} , авгит $Ca_{40}Mg_{39}Fe_{21}$ и гиперстен $Ca_3Mg_{58}Fe_{39}$ (рис. 2). Промежутки между ними заполняют лабрадор An_{58-52} , плавно зональные ферроавгит $Ca_{43-44}Mg_{36-17}Fe_{29-39}$ и ферросалит $Ca_{45-47}Mg_{26-11}Fe_{29-42}$ (до редкого позднего феррогенденбергита $Ca_{43}Mg_5Fe_{52}$), зональные феррогиперстен $Ca_{4-5}Mg_{32-30}Fe_{64-65}$ и близкий к нему по составу ферропижонит

Рис. 1. Срастание идиоморфных кристаллов анортита (серый), с включениями пироксенов (светло-серые), с широкой каймой битовнита (темно-серый) в гнезде титаномagnetита (белый). Немного ксеноморфного кварца (черный). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 1. Intergrowth of idiomorphous anorthite crystals (grey), with inclusions of pyroxenes (light-grey), wide rim of bytownite (dark-grey) in a pocket of titanomagnetite (white); a bit of xenomorphous quartz (black). BSE image.



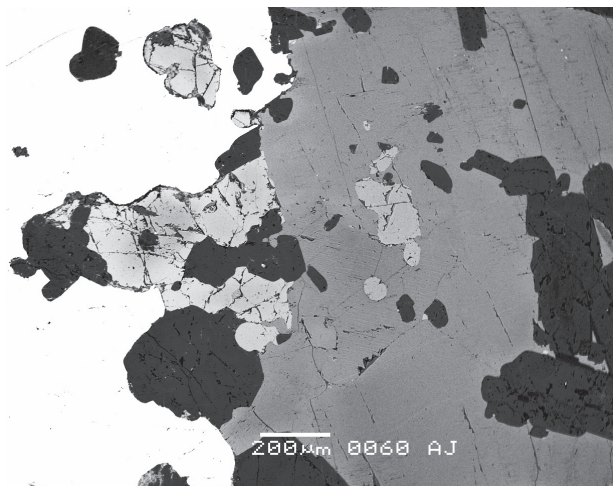


Рис. 2. Идиоморфные кристаллы анортита (черно-серые) включены в авгит (серый), бронзит (светло-серый) и титаномагнетит (белый). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 2. Idiomorphic anorthite crystals (dark-grey) as inclusions inside augite (grey), bronzite (light-grey) and titanomagnetite (white). BSE image.

$\text{Ca}_6\text{Mg}_{45-30}\text{Fe}_{49-64}$, андезин An_{48-33} с тонкими каймами олигоклаза An_{22} , титаномагнетит с 2 мас. % V, ильменит, акцессорные хлор-гидроксил-фтор-апатит с 1 % Sr и 0.5 % Ce+La+Nd (изредка с оторочками хлор-фторапатита с 2—4 мас. % Ce+La+Nd), редкие цирконолит, чевкинит, перрьерит, бадделит, халькопирит. Соотношения количеств моноклинного и ромбического пироксенов от ~1:1 до ~2:1. Размер ксеноморфных кристаллов титаномагнетита до 3—6 мм; его состав: ~40 % минала ульвошпинели Fe_2TiO_4 , ~50 % минала магнетита FeFe_2O_4 , ~10 % минала шпинели-герцинита $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Al}_2\text{O}_4$. Акцессорный ильменит беден миналом гематита, его содержание не превышает 7 мол. %. Поздние образования габброидов представляют широко распространенные ксеноморфные кварц и микрографические срастания кварц—олигоклаз и кварц—ортоклаз-микрпертит, редкие титанистые и высокожелезистые паргасит и биотит (с 4—5 мас. % TiO_2), акцессорные моноклинный пирротин Fe_7S_8 , зональный алланит-(Ce) с оторочками редкоземельного эпидота — клиноцоизита, циркон, халькопирит, торит, пирит, монацит, сфалерит, галенит, редчайшие микронного размера арсенопирит, кобальтин, гессит.

Чевкинит-(Ce) из кварцевых габброидов Аю-Дага

Чевкинит — характерный акцессорный минерал щелочных магматических пород, высокотемпературных щелочных метасоматитов, а вовсе не островодужных габброидов. Однако, это — редкий, но повсеместно распространенный акцессорный минерал габброидов Первомайско-Аюдагского интрузивного комплекса. В кварцевых габброидах Аю-Дага чевкинит слагает обособленные коротко призматические кристаллы неоднородного состава размером до 0.1 мм, нередко в срастании с бадделитом (рис. 3). Заметная часть чевкинита слагает реликты в зональных кристаллах позднемагматического алланита-(Ce) (рис. 4).

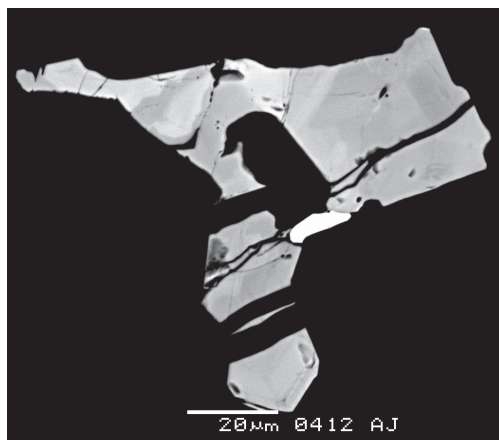


Рис. 3. Неоднородный по составу кристалл магний-доминантного чевкинита-(Ce) (ан. 1—5, табл. 1) в сростании с бадделейитом (белый). Плагиоклазы и пироксены — черные. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 3. Compositionally heterogeneous crystal of magnesium-dominant chevkinite-(Ce) (an. 1—5, Table 1) in intergrowth with baddeleyite (white). Black — plagioclases and pyroxenes. BSE image.

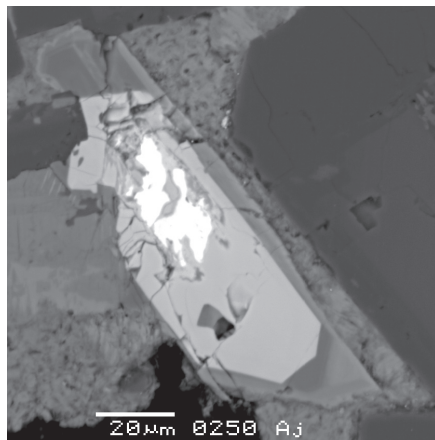


Рис. 4. Реликты чевкинита-(Ce) (белый) (ан. 6—9, табл. 2) в зональном кристалле алланита (светло-серый разных оттенков) с оторочкой редкоземельного эпидота. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 4. Relicts of chevkinite-(Ce) (white, an. 6—9, Table 2) in a zonal allanite crystal (light-grey of different tints) with a fringe of REE-bearing epidote. BSE image.

Чевкинит-(Ce), встречающийся в виде обособленных кристаллов, по составу необычен — магний-доминантный, содержит 40—42 мас. % оксидов лантанидов цериевой группы; их распределение — $Ce \gg La > Nd \gg Pr > Gd, Sm, Tb, Dy$; церий составляет 55—58 % суммы лантанидов; заметно варьирует соотношение содержаний лантана и неодима (от 1.9 до 2.6, ан. 1—5, табл. 1). Минерал содержит 0.7—1.5 % Y_2O_3 , 0.3—0.4 % Sc_2O_3 , 0.7—1.7 % ZrO_2 , 0.3—0.9 % ThO_2 . Состав минерала отвечает формуле — $[Ce_{1.5}La_{0.8-0.9}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1}(Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1} \times Y_{0.1-0.2}Sc_{0.1}Ca_{0.7-0.8}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})(Fe^{3+}_{1.1-1.2}Ti_{0.4-0.7}Zr_{0.1-0.2}Al_{0.1-0.2})_2Ti_2 \times [(Si_{3.7-4}Al_{0.3-0})_4O_{22}]$ (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав (мас. %) обособленных выделений магний-доминантного чевкинита-(Ce) (рис. 3). Кварцевые габбро-норит-долериты Аю-Дага, Крым
 Chemical composition (wt %) of isolated segregations of the magnesium-dominant chevkinite-(Ce) (Fig. 3). Quartz-bearing gabbro-norite-dolerites of the Ayu-Dag intrusion, Rocky Crimea

Компонент	1	2	3	4	5
SiO ₂	20.15	19.58	19.46	20.02	19.01
TiO ₂	15.76	18.95	17.65	17.05	18.25
ZrO ₂	1.68	0.98	1.31	0.69	1.57
Al ₂ O ₃	0.80	1.22	1.16	0.91	1.20
V ₂ O ₃	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40
Fe ₂ O ₃	10.75	10.87	10.51	11.04	10.33
FeO	—	—	—	—	—
MnO	нпо	нпо	0.18	0.17	нпо
MgO	1.94	1.91	1.91	1.95	1.96

Таблица 1 (продолжение)

Компонент	1	2	3	4	5
Sc ₂ O ₃	0.37	0.39	0.30	0.41	0.39
Y ₂ O ₃	1.51	1.26	1.48	0.85	1.09
La ₂ O ₃	11.80	11.47	11.01	12.01	11.78
Ce ₂ O ₃	21.16	21.95	21.08	21.52	21.54
Pr ₂ O ₃	1.41	1.72	1.49	1.80	1.38
Nd ₂ O ₃	5.40	5.86	5.92	6.11	4.74
Sm ₂ O ₃	0.45	0.33	0.45	0.36	0.36
Gd ₂ O ₃	0.58	0.50	0.72	0.49	0.52
Tb ₂ O ₃	0.51	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	0.45	0.38	0.44	нпо	0.36
ThO ₂	0.65	0.33	0.48	0.85	0.37
CaO	3.16	3.80	3.30	3.11	3.68
Na ₂ O	0.36	0.28	0.37	0.33	0.32
Сумма	99.21	102.18	99.62	100.07	98.80

Число атомов в формуле в расчете на 13 атомов металлов и кремния
при 22 атомах кислорода

La	0.86	0.81	0.79	0.87	0.85
Ce	1.53	1.53	1.51	1.53	1.54
Pr	0.10	0.09	0.11	0.13	0.09
Nd	0.38	0.40	0.41	0.43	0.33
Sm	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02
Gd	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03
Tb	0.03	0.03	0.03	—	—
Dy	0.03	0.02	0.03	—	0.02
Sc	0.07	0.07	0.05	0.07	0.07
Y	0.16	0.13	0.16	0.09	0.11
Th	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02
Ca	0.67	0.78	0.69	0.65	0.77
Na	0.14	0.12	0.14	0.12	0.12
Сумма	4.07	4.02	3.99	3.98	3.98
Ti	2	2	2	2	2
Mg	0.58	0.54	0.56	0.57	0.57
Fe ³⁺	0.42	0.46	0.41	0.40	0.43
Mn	—	—	0.03	0.03	—
Сумма	1	1	1	1	1
Fe ³⁺	1.18	1.10	1.14	1.23	1.12
Al ^{VI}	0.18	—	0.08	0.14	—
Ti	0.36	0.72	0.60	0.51	0.59
Zr	0.16	0.09	0.13	0.07	0.15
V	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
Сумма	1.93	1.97	2.01	2.01	2.02
Si	3.99	3.73	3.81	3.93	3.72
Al ^{IV}	0.01	0.27	0.19	0.07	0.28
Сумма	4	4	4	4	4
O	22	22	22	22	22

Примечание. Здесь и далее — нпо — ниже предела обнаружения; Sr, Cr, U, Hf, Rb, Ta, Lu, Yb, Tm, Er, Ho, Eu, P, S, F — не обнаружены; количество Fe₂O₃ и FeO рассчитано по балансу зарядов.

Чевкинит-(Ce) из включений в алланите (рис. 4) по составу стандартный — беден магнием, содержит 40—42 мас. % оксидов лантанидов цериевой группы; их распределение — Ce >> La > Nd >> Pr > Gd, Sm, Tb, Dy; церий составляет 54—57 % суммы лантанидов; заметно варьирует соотношение содержаний в минерале лантана и неодима (от 1.1 до 2.1, ан. 6—9, табл. 2). Минерал содержит 0.6—1.5 % Y₂O₃, 0.3—0.5 % Sc₂O₃, обогащен титаном, беден цирконием 0—1.6 % ZrO₂, несколько обогащен торием — 1.6—2.8 % ThO₂. Состав минерала отвечает формуле — [Ce_{1.5–1.7}La_{0.6–0.9}Nd_{0.5–0.6}Pr_{0.1}(Gd+Sm)_{0.1}Y_{0.1–0.2}Sc_{0.1}Ca_{0.6–0.8}Na_{0.1}]₄ × (Fe²⁺_{0.6–1}Mg_{0–0.1}Fe³⁺_{0–0.4})₁(Ti_{0.8–0.9}Fe³⁺_{0.3–0.7}Al_{0.2–0.4}Zr_{0–0.2})₂Ti₂[(Si_{3.9–4}Al_{0.1–0})₄O₂₂] (табл. 2). Проявлена отрицательная корреляция содержаний циркония и тория.

Таблица 2

Химический состав (мас. %) чевкинита-(Ce) из включений в алланите (рис. 4). Кварцевые габбро-норит-долериты Аю-Дага, Крым
Chemical composition (wt %) of chevkinite-(Ce) occurring as inclusions in allanite-(Ce) (Fig. 4)

Компонент	6	7	8	9
SiO ₂	19.78	19.39	19.38	20.04
TiO ₂	19.06	18.74	19.04	19.47
ZrO ₂	1.60	нпо	нпо	1.29
Al ₂ O ₃	1.53	1.78	2.00	1.25
Fe ₂ O ₃	7.19	3.81	1.95	4.97
FeO	3.43	6.14	6.44	5.57
MnO	0.12	нпо	0.15	0.17
MgO	0.25	0.11	нпо	нпо
Sc ₂ O ₃	0.45	0.38	0.34	0.45
Y ₂ O ₃	1.52	1.02	0.61	1.37
La ₂ O ₃	10.54	11.91	12.40	8.68
Ce ₂ O ₃	21.15	22.32	22.31	21.58
Pr ₂ O ₃	2.04	1.69	1.47	1.80
Nd ₂ O ₃	7.11	6.33	6.15	7.95
Sm ₂ O ₃	0.70	0.56	0.40	нпо
Gd ₂ O ₃	0.48	0.57	0.62	нпо
ThO ₂	1.61	2.72	2.81	1.82
CaO	3.51	2.58	2.90	3.79
Na ₂ O	0.29	0.31	0.33	0.26
Сумма	102.36	100.36	99.30	100.29

Число атомов в формуле в расчете на 13 атомов металлов и кремния при 22 атомах кислорода

La	0.76	0.89	0.93	0.63
Ce	1.51	1.65	1.66	1.56
Pr	0.15	0.12	0.11	0.13
Nd	0.50	0.46	0.45	0.56
Sm	0.05	0.04	0.03	0.02
Gd	0.03	0.04	0.04	0.03
Sc	0.08	0.07	0.06	0.08
Y	0.16	0.11	0.07	0.14
Th	0.07	0.12	0.13	0.08
Ca	0.73	0.56	0.63	0.80

Таблица 2 (продолжение)

Компонент	6	7	8	9
Na	0.11	0.12	0.13	0.10
Сумма	4.15	4.18	4.24	4.08
Ti	2	2	2	2
Mg	0.07	0.03	—	—
Fe ²⁺	0.56	0.97	0.97	0.92
Fe ³⁺	0.35	—	—	0.08
Mn	0.02	—	0.03	—
Сумма	1	1	1	1
Fe ³⁺	0.71	0.58	0.30	0.66
Fe ²⁺	—	0.07	0.13	—
Al ^{VI}	0.21	0.33	0.43	0.24
Ti	0.79	0.84	0.91	0.89
Zr	0.15	—	—	0.13
Сумма	1.86	1.82	1.77	1.92
Si	3.86	3.91	3.95	3.95
Al ^{IV}	0.14	0.09	0.05	0.05
Сумма	4	4	4	4
O	22	22	22	22

Примечание. Tb, Dy, Sr — не обнаружены.

Перрьерит-(Ce) кварцевых габброидов Аю-Дага

Как и чевкинит, перрьерит — характерный акцессорный минерал щелочных магматических пород, высокотемпературных щелочных метасоматитов, а не островодужных габброидов. При этом он является редким, хотя и повсеместно распространённым акцессорным минералом габброидов Первомайско-Аюдагского интрузивного комплекса.

Перрьерит в кварцевых габброидах Аю-Дага слагает обособленные коротко призматические идиоморфные кристаллы размером до 0.1 мм, обычно сложно секториально зональные (рис. 5, 6). Нередки сростания перрьерита с магнизальным ильменитом (рис. 7). Заметная часть перрьерита слагает ре-

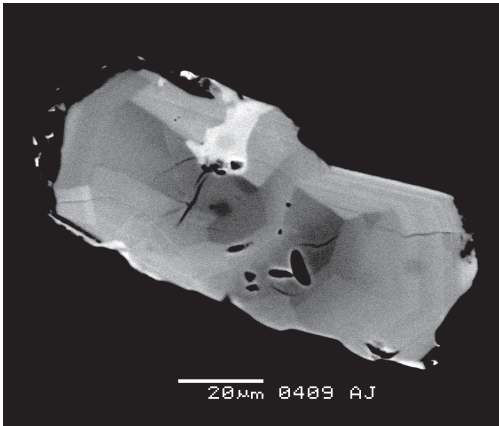


Рис. 5. Сложно секториально зональный кристалл магний-доминантного перрьерита-(Ce) (ан. 10—14, табл. 3). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 5. Complicatedly sectorial zonal crystal of magnesium-dominant perrierite-(Ce) (an. 10—14, Table 3). BSE image.

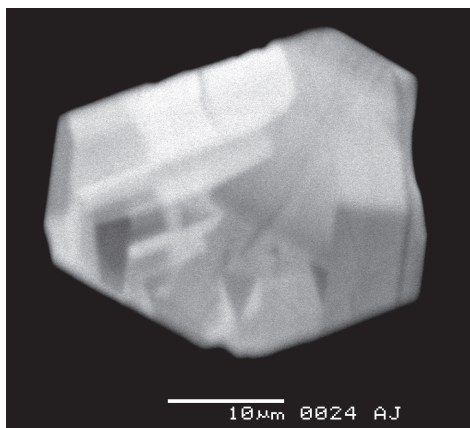


Рис. 6. Сложно секториально зональный кристалл магний-доминантного перрьерита-(Ce) (ан. 15—17, табл. 3). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 6. Complicatedly sectorial zonal crystal of magnesium-dominant perrierite-(Ce) (an. 15—17, Table 3). BSE image.

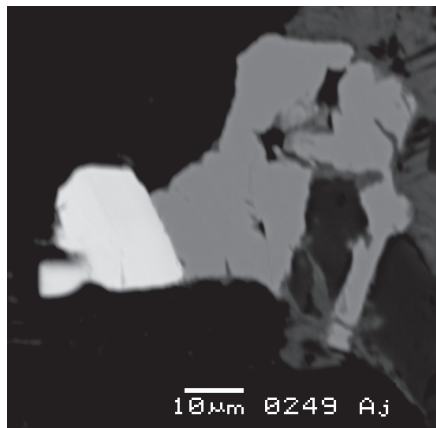


Рис. 7. Незональный кристалл обогащенного магнием перрьерита-(Ce) (белый) (ан. 18, табл. 4) в сростании с ильменитом (серый). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 7. Non-zonal crystal of enriched in magnesium perrierite-(Ce) (white, an. 18, Table 4) in the intergrowth with ilmenite (grey). BSE image.

ликты в центре зональных кристаллов позднемагматического алланита-(Ce) (рис. 8, 9); с этим перрьеритом ассоциирует бадделейт.

Перрьерит-(Ce) обособленных секториально зональных кристаллов по составу магний-доминантный, содержит 35—42, обычно <40 мас. % оксидов лантанидов цериевой группы; их распределение — $Ce \gg La > Nd \gg Pr > Gd, Sm, Tb, Dy$; церий составляет 54—58 % суммы лантанидов; соотношение содержаний лантана и неодима в минерале варьирует от 1.5 до 2.2 (ан. 10—17, табл. 3). Более светлоокрашенные (в отраженных электронах) сектора роста и зоны этих кристаллов содержат больше тория (вариации содержаний тория в одном кристалле перрьерита от 0.4 до 2.5 мас. %). Минерал содержит

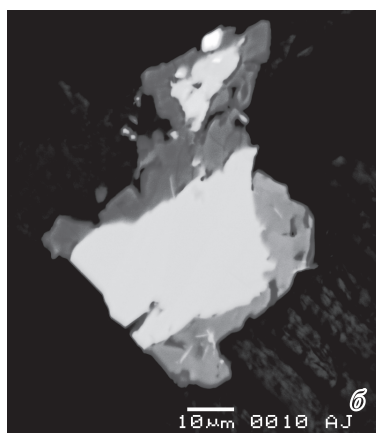
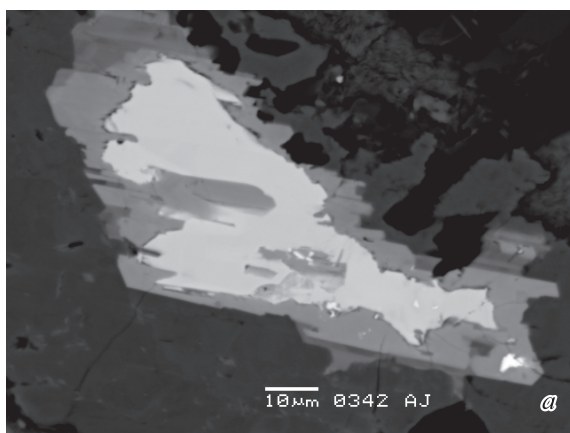


Рис. 8. Интенсивно корродированный перрьерит-(Ce) (светло-серый) в алланите (серый). а — ан. 19—21, табл. 4; б — ан. 22, табл. 4. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 8. Intensely corroded perrierite-(Ce) (light-grey) in allanite (grey). a — an. 19—21, Table 4; б — an. 22, Table 4. BSE image.

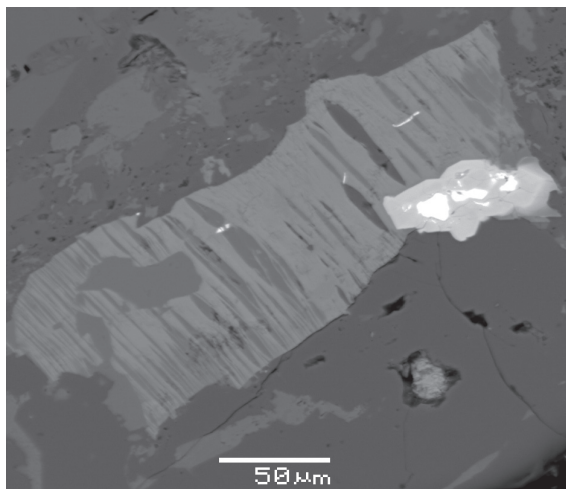


Рис. 9. Реликты перрьерита-(Ce) (белый) (ан. 23—25, табл. 4) в алланите (серый) среди биотита (темно-серый). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 9. Relicts of perrierite-(Ce) (white, an. 23—25, Table 4) in allanite (grey) among biotite (dark-grey). BSE image.

0.7—1.3 % Y_2O_3 , 0.2—0.6 % Sc_2O_3 , 0.4—2.4 % ZrO_2 , до 0.6 % стронция, следы урана (до 0.17 % UO_2 в одном анализе из тридцати), следы гафния (до 0.33 % HfO_2 в одном анализе из тридцати, при соотношении $Zr/Hf \sim 4$), следы Nb (до 0.26 % Nb_2O_5 в одном анализе из тридцати). Состав минерала — $[Ce_{1.2-1.6} \times La_{0.6-0.8}Nd_{0.3-0.4}Pr_{0.1}(Gd+Sm+Tb+Dy)_{0.1}Y_{0.1}Sc_{0.1}Ca_{1.0-1.1}Sr_{0-0.1}Na_{0.1}]_4(Mg_{0.9-1} \times Fe^{3+}_{0.1-0})_1(Fe^{3+}_{1.0-1.2}Al_{0.2-0.7}Ti_{0.3-0.5}Zr_{0-0.2})_2Ti_2[(Si_{3.9-4}Al_{0.1-0})_4(O_{21.3-21.5}OH_{0.7-0.5})_{22}]$ (табл. 3). Проявлена отрицательная корреляция содержаний циркония и тория.

Таблица 3

Химический состав (мас. %) магний-доминантного перрьерита-(Ce), встречающегося в виде обособленных секториально зональных кристаллов: ан. 10—14 (рис. 5), 15—17 (рис. 6). Кварцевые габбро-норит-долериты Аю-Дага, Крым
Chemical composition (wt %) of magnesium-dominant perrierite-(Ce) occurring as sectorial zonal crystals: an. 10—14 (Fig. 5), 15—17 (Fig. 6)

Компо- нент	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	21.06	21.46	21.60	22.01	21.81	20.40	20.34	21.93
TiO ₂	16.66	17.93	17.40	18.16	17.97	15.99	17.17	17.27
ZrO ₂	0.40	2.20	1.70	2.37	2.39	1.23	0.60	2.20
Al ₂ O ₃	2.15	1.56	2.29	2.47	2.45	2.14	1.72	3.35
Fe ₂ O ₃	8.16	7.85	7.88	7.21	7.23	7.47	8.66	7.32
FeO	—	—	—	—	—	—	—	—
MnO	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
MgO	3.49	3.55	3.53	3.55	3.57	3.30	3.38	3.49
Sc ₂ O ₃	0.62	0.31	0.36	0.63	0.29	0.20	0.15	0.19
Y ₂ O ₃	0.91	0.96	0.71	0.93	0.75	0.92	1.28	1.00
La ₂ O ₃	9.74	8.62	9.16	9.93	9.43	10.62	11.01	10.52
Ce ₂ O ₃	18.77	17.64	17.99	18.01	17.74	22.03	21.19	20.66

Таблица 3 (продолжение)

Компонент	10	11	12	13	14	15	16	17
Pr ₂ O ₃	1.63	1.37	1.54	1.13	1.38	1.56	1.45	1.49
Nd ₂ O ₃	6.07	5.72	5.97	5.07	4.95	5.21	5.16	4.92
Sm ₂ O ₃	0.67	0.62	0.44	0.63	0.58	0.37	0.43	нпо
Gd ₂ O ₃	0.68	0.72	0.74	0.51	0.56	0.63	0.67	0.35
Tb ₂ O ₃	нпо	0.41	0.56	нпо	0.61	0.63	0.65	нпо
Dy ₂ O ₃	0.38	0.39	нпо	нпо	0.69	0.73	нпо	нпо
ThO ₂	2.35	2.03	2.29	0.69	0.68	0.71	1.27	0.80
CaO	4.83	5.46	4.90	5.85	5.77	4.85	5.17	4.89
SrO	0.54	0.59	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Na ₂ O	0.27	0.32	0.36	0.39	0.37	0.21	нпо	0.31
Сумма	99.38	99.70	99.68	99.54	99.22	99.19	100.30	100.69

Число атомов в формуле в расчете на 13 атомов металлов и кремния
при 22 атомах кислорода

La	0.68	0.59	0.63	0.67	0.64	0.75	0.77	0.71
Ce	1.29	1.20	1.22	1.20	1.19	1.55	1.47	1.38
Pr	0.11	0.09	0.10	0.07	0.09	0.11	0.10	0.10
Nd	0.41	0.38	0.40	0.33	0.33	0.36	0.35	0.32
Sm	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	—
Gd	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02
Tb	—	0.03	0.03	—	0.04	0.04	0.04	—
Dy	0.02	0.02	—	—	0.04	0.05	—	—
Sc	0.10	0.05	0.06	0.10	0.08	0.03	0.03	0.03
Y	0.09	0.10	0.07	0.09	0.07	0.09	0.12	0.10
Th	0.10	0.09	0.10	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03
Ca	0.97	1.09	0.98	1.14	1.09	1.00	1.05	0.96
Sr	0.06	0.06	—	—	—	—	—	—
Na	0.10	0.11	0.13	0.14	0.13	0.08	—	0.11
Сумма	4.01	3.89	3.80	3.84	3.80	4.15	4.05	3.76
Ti	2	2	2	2	2	2	2	2
Mg	0.98	0.98	0.98	0.95	0.98	0.94	0.96	0.95
Fe ³⁺	0.02	0.02	—	0.05	0.02	0.06	0.04	0.05
Mn	—	—	0.04	—	—	—	—	—
Сумма	1	1	1	1	1	1	1	1
Fe ³⁺	1.14	1.08	1.10	0.94	0.98	1.02	1.21	0.96
Al ^{VI}	0.45	0.33	0.50	0.53	0.53	0.40	0.24	0.72
Ti	0.36	0.50	0.43	0.48	0.48	0.31	0.45	0.37
Zr	0.04	0.20	0.15	0.21	0.21	0.12	0.05	0.20
Сумма	1.99	2.11	2.18	2.16	2.20	1.85	1.95	2.25
Si	3.98	3.99	4.01	4.00	4.01	3.92	3.86	4.00
Al ^{IV}	0.02	0.01	—	—	—	0.08	0.14	—
Сумма	4.00	4.00	4.01	4.00	4.01	4.00	4.00	4.00
O	21.27	21.43	21.48	21.32	21.43	21.28	21.40	21.50
OH	0.73	0.57	0.52	0.68	0.57	0.72	0.60	0.50
Сумма	22	22	22	22	22	22	22	22

Перрьерит-(Ce) в сростании с магнезиальным ильменитом (рис. 7) по составу магний-доминантный и обогащен торием (ан. 18, табл. 4). Его состав отвечает формуле — $(\text{Ce}_{1.28}\text{La}_{0.66}\text{Nd}_{0.43}\text{Th}_{0.14}\text{Y}_{0.10}\text{Pr}_{0.09}\text{Sc}_{0.08}\text{Gd}_{0.04}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{1.18}\text{Na}_{0.06})_{4.09} \times (\text{Mg}_{0.53}\text{Fe}^{3+}_{0.47})_1(\text{Fe}^{3+}_{0.86}\text{Al}_{0.68}\text{Ti}_{0.30}\text{Zr}_{0.07})_{1.91}\text{Ti}_2[(\text{Si}_{3.97}\text{Al}_{0.03})_4(\text{O}_{21.38}\text{OH}_{0.62})_{22}]$.

Перрьерит-(Ce) включений в алланите (рис. 8, 9) беден магнием, содержит 37—40, чаще 37—38 мас. % оксидов лантанидов цериевой группы; их распределение — $\text{Ce} \gg \text{La} > \text{Nd} \gg \text{Pr} > \text{Gd}, \text{Sm}$; церий составляет 54—58 % суммы лантанидов; заметно варьирует соотношение содержаний лантана и неодима от 1.4 до 2.3 (ан. 19—25, табл. 4). Перрьерит включений в алланите содержит 0.6—1.3 % Y_2O_3 , 0.3—0.5 % Sc_2O_3 , 1.7—2.6 % ZrO_2 , 0.5—3.0 % ThO_2 ; его состав отвечает формуле — $[\text{Ce}_{1.3-1.5}\text{La}_{0.7-0.8}\text{Nd}_{0.3-0.5}\text{Pr}_{0.1}(\text{Gd}+\text{Sm})_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{Sc}_{0.1} \times \text{Ca}_{1.1-1.3}\text{Na}_{0.1}]_4(\text{Fe}^{2+}_{0.4-0.5}\text{Fe}^{3+}_{0.2-0.4}\text{Mg}_{0.2})_1(\text{Al}_{0.5-0.7}\text{Ti}_{0.3-0.8}\text{Fe}^{3+}_{0.3-0.9}\text{Zr}_{0.1-0.3})_2\text{Ti}_2 \times [(\text{Si}_{3.9-4}\text{Al}_{0.1-0})_4(\text{O}_{21.4-22}\text{OH}_{0.6-0})_{22}]$.

Таблица 4

Химический состав (мас. %) перрьерита-(Ce) в сростании с ильменитом — ан. 18 (рис. 7) и из включений в алланите: ан. 19—21 (рис. 8, а), 22 (рис. 8, б), 23—25 (рис. 9).

Кварцевые габбро-норит-долериты Аю-Дага, Крым

Chemical composition (wt %) of perrierite-(Ce) inter-growing with ilmenite — an. 18 (Fig. 7), and from inclusions in allanite an. 19—21 (Fig. 8, a), 22 (Fig. 8, b), 23—25 (Fig. 9)

Компонент	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO ₂	21.52	20.12	20.18	20.20	20.59	20.08	20.22	20.92
TiO ₂	16.57	19.48	18.98	18.92	19.61	18.96	19.56	19.39
ZrO ₂	0.81	2.02	2.00	2.17	2.85	2.07	2.58	1.66
Al ₂ O ₃	3.73	2.95	2.93	3.50	3.11	3.12	3.03	3.29
Fe ₂ O ₃	10.31	5.37	6.32	4.84	5.71	5.35	5.46	5.44
FeO	—	2.19	1.87	2.18	1.59	2.29	1.93	2.55
MnO	нпо	0.21	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
MgO	1.94	0.75	0.72	0.70	0.71	0.65	0.69	0.62
Sc ₂ O ₃	0.48	0.36	0.40	0.49	0.39	0.35	0.30	0.40
Y ₂ O ₃	1.04	0.72	0.66	0.77	0.82	0.67	0.58	1.29
La ₂ O ₃	8.27	9.63	10.15	9.87	9.76	10.72	10.63	9.52
Ce ₂ O ₃	17.42	19.32	19.50	19.64	18.89	21.01	20.90	21.05
Pr ₂ O ₃	1.31	1.45	1.33	1.30	1.45	1.37	1.39	1.51
Nd ₂ O ₃	6.55	6.11	5.86	5.44	5.67	5.23	4.73	6.75
Sm ₂ O ₃	0.42	0.52	0.30	0.37	0.44	нпо	нпо	0.51
Gd ₂ O ₃	0.61	0.44	нпо	0.40	0.57	0.35	нпо	0.29
ThO ₂	3.29	1.88	2.72	2.96	1.44	1.16	0.54	0.89
CaO	5.97	5.69	5.42	5.84	6.28	5.32	5.98	5.45
Na ₂ O	0.16	0.25	0.39	0.26	0.37	0.30	0.31	0.25
Сумма	100.40	99.46	99.73	99.85	100.20	98.99	98.83	100.89

Число атомов в формуле в расчете на 13 атомов металлов и кремния при 22 атомах кислорода

La	0.66	0.68	0.72	0.70	0.68	0.76	0.75	0.66
Ce	1.28	1.36	1.37	1.38	1.30	1.49	1.46	1.45
Pr	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10
Nd	0.43	0.43	0.40	0.37	0.38	0.36	0.32	0.45

Таблица 4 (продолжение)

Компонент	18	19	20	21	22	23	24	25
Sm	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	—	—	0.03
Gd	0.04	0.03	—	0.03	0.04	0.02	—	0.02
Sc	0.08	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.05	0.07
Y	0.10	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.13
Th	0.14	0.08	0.12	0.13	0.06	0.05	0.02	0.04
Ca	1.18	1.17	1.11	1.20	1.27	1.10	1.23	1.09
Na	0.06	0.09	0.15	0.10	0.13	0.11	0.11	0.09
Сумма	4.09	4.10	4.11	4.18	4.13	4.12	4.10	4.13
Ti	2	2	2	2	2	2	2	2
Mg	0.53	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.17
Fe ²⁺	—	0.35	0.30	0.35	0.25	0.37	0.31	0.40
Fe ³⁺	0.47	0.41	0.49	0.45	0.55	0.44	0.50	0.43
Mn	—	0.03	—	—	—	—	—	—
Сумма	1	1	1	1	1	1	1	1
Fe ³⁺	0.86	0.37	0.43	0.25	0.26	0.34	0.29	0.34
Al ^{VI}	0.68	0.53	0.53	0.66	0.57	0.59	0.55	0.65
Ti	0.30	0.81	0.74	0.72	0.78	0.75	0.82	0.73
Zr	0.07	0.19	0.19	0.20	0.26	0.20	0.24	0.15
Сумма	1.91	1.90	1.89	1.83	1.87	1.88	1.90	1.87
Si	3.97	3.86	3.87	3.87	3.88	3.88	3.87	3.92
Al ^{IV}	0.03	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	0.08
Сумма	4	4	4	4	4	4	4	4
O	21.38	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
ОН	0.62	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	22	22	22	22	22	22	22	22

Примечание. Tb, Dy, Sr — не обнаружены.

Сравнение чевкинита-(Ce) и перрьерита-(Ce) из габброидов Аю-Дага

Оба минерала — одни из главных концентраторов и носителей лантанидов в габброидах Аю-Дага. Распределение лантанидов в чевкините и перрьерите — $Ce \gg La > Nd \gg Pr > Gd, Sm, Tb, Dy$. Количественный состав лантанидов в чевкините и в перрьерите идентичен: Ce (54—58 % REE) — La (25—31 %) — Nd (12—20 %). Содержания Zr, Th, Y, Sc в обоих полиморфах в габброидах Аю-Дага идентичны. И чевкинит, и перрьерит, встречающиеся в виде обособленных кристаллов, представлены магний-доминантными разновидностями, возможно, это — более ранние образования. И чевкинит, и перрьерит, слагающие включения в центре кристаллов алланита, представлены бедными магнием разновидностями, возможно, это — более поздние образования. По многим особенностям состава обособленный перрьерит в сростании с ильменитом близок к составу чевкинита обособленных кристаллов, аналогично — близки перрьерит из включений в алланите и чевкинит из включений в алланите.

По сравнению с аналогичными минералами из иных магматических пород, основная особенность чевкинита-(Ce) и перрьерита-(Ce) Аю-Дага — это широкое распространение среди них магний-доминантных разновидностей.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Раннемагматические минеральные ассоциации островодужных низкощелочных анортит-битовнитовых кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг включают недосыщенные кремнеземом акцессорные минералы Ti—Zr—LREE: чевкинит-(Ce), перрьерит-(Ce), цирконолит, бадделеит. Дополнительным источником Zr и Th для этих минеральных фаз могли послужить растворяющиеся в аюдагской базитовой магме древние реститовые циркон и торит (Спиридонов и др., 2016, 2018).

Чевкинит-(Ce) и перрьерит-(Ce) — одни из основных минералов концентраторов и носителей лантанидов в габброидах Аю-Дага, несмотря на то что значительная их часть на позднемагматическом этапе была замещена аллани-том-(Ce). Среди аюдагских чевкинита и перрьерита широко распространены магний-доминантные разновидности, наряду с обычными бедными магнием разновидностями.

Наличие чевкинита и перрьерита, как и цирконолита, в нетипичной геохимической обстановке, возможно, объясняется слабым развитием позднемагматических процессов в мало глубинных и бедных флюидами габброидных интрузивах мезозойского Горного Крыма. В противном случае, вся масса чевкинита и перрьерита была бы замещена аллани-том, что, вероятно, и имеет место в более глубинных, крупных и насыщенных флюидами интрузивах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 16-05-00241 и 19-05-00490).

Список литературы

- Ананьев В. А., Ревердатто В. В. Уникальная ассоциация Fe-апатит—Fe-кордиерит—фаялит Аю-Дага — результат контактового метаморфизма // Докл. РАН. **1997**. Т. 353. № 3. С. 362—364.
- Барсанов Г. П. Минералы Ильменского заповедника. Изд-во Уральского филиала АН СССР. **1949**. 475 с.
- Болдырев А. К., Бетехтин А. Г., Годлевский М. Н., Григорьев Д. П., Киселёв А. И., Левицкий О. Д., Разумовский Н. К., Смирнов А. А., Соболев В. С., Соловьёв С. П., Успенский Н. М., Черных В. В., Шаталов Е. Т., Шафрановский И. И. Курс минералогии. М.; Л.: ОНТИ, **1938**. 1136 с.
- Ганзеев А. А., Гречищев О. К. Новый генетический тип редкометалльных щелочных гранитов Мадагаскара // Геология и геофизика. **2003**. Т. 44. № 6. С. 539—553.
- Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов (ред. К. А. Власов). Т. 2. М.: Наука, **1964**. 830 с.
- Ерёменко Г. К., Ерёменко Е. И. Метакарбонатные контактовые роговики Аю-Дага // Докл. АН УССР. Сер. Б. **1972**. № 7. С. 585—589.
- Защиха Б. В. Постмагматическая минерализация гранитоидов Каменных Могил (Приазовье). В кн.: Рудообразующая среда по включениям в минералах. М.: Наука, **1972**. С. 178—184.
- Капустин Ю. Л. Чевкинит из фенитов щелочных массивов Восточной Тувы // Тр. Мин. музея АН СССР им. А. Е. Ферсмана. **1987**. Вып. 34. С. 71—75.
- Крыжановский В. И. Чевкинит из Ильменских гор // Изв. Росс. АН. VI сер. **1924**. Т. 18. Вып. 12—18. С. 321—326.
- Лагорю А. Е. К геологии Крыма. О некоторых массивных горных породах Крыма и их геологическом значении // Зап. Варшавского ун-та. **1887**. № 5. С. 1—16, № 6. С. 17—48.
- Лазаренко Е. К., Лавриненко Л. Ф., Бучинская Н. И. Минералогия Приазовья. Киев: Наукова Думка. **1981**. 431 с.
- Лучицкий В. И. Петрография Крыма. Петрография СССР. Серия 1. Региональная петрография. Вып. 8. М.; Л.: Изд-во АН СССР, **1939**. 98 с.
- Ляхович В. В. Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза. М.: Наука. **1967**. 447 с.

Мейстер А. К. Материалы по петрографии Крыма // Изв. Геокома. СПб. **1908**. Т. 27. № 10. С. 669—706.

Морозова Е. Б., Сергеев С. А., Суфиев А. А. U-Pb цирконовый (Shrimp) возраст Джидайрской интрузии как реперного объекта для геологии Крыма // Вестн. СПбГУ. Геология и география. **2012**. Вып. 4. С. 25—33.

Муратов М. В. Геология Крымского полуострова. М.: Недра, **1973**. 192 с.

Плошко В. В., Сиденко О. Г., Иванов В. И., Сукач В. С. Ассоциация пикритов и кварцевых диабазов Крыма // Докл. АН СССР. **1979**. Т. 244. С. 442—445.

Попов С. П. Минералогия Крыма. М.: Изд-во АН СССР, **1938**. 352 с.

Рид С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, **2008**. 232 с.

Савельева В. Б., Карманов Н. С. Редкоземельные минералы щелочных метасоматитов Главного Саянского разлома // ЗРМО. **2008**. Ч. 137. Вып. 2. С. 31—52.

Спиридонов Э. М., Фёдоров Т. О., Ряховский В. М. Магматические образования Горного Крыма. Статьи 1 и 2 // Бюлл. МОИП. Отд. геол. **1990**. Т. 65. Вып. 4. С. 119—134. Вып. 6. С. 102—112.

Спиридонов Э. М., Филимонов С. В., Коротаева Н. Н., Семиколенных Е. С. Цирконолит, бадделлит, чевкинит, ильменит, циркон, торит, ортит, монацит островодужных анортит-битовнитовых кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Крым / Федоровская сессия 2016. СПб.: ЛЕМА, **2016**. С. 171—173.

Спиридонов Э. М., Филимонов С. В., Семиколенных Е. С., Коротаева Н. Н., Кривицкая Н. Н. Цирконолит, бадделлит, циркон и торит островодужных анортит-битовнитовых кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // Вестн. МГУ. Геология. **2018**. № 6. С. 71—79.

Хейнрих Э. У. Минералогия и геохимия радиоактивного минерального сырья. М.: ИЛ, **1962**. 605 с.

References

Ananiev V. A., Reverdatto V. V. Unic association Fe-apatite—Fe-cordierite—fayalite of the Au-Dag — product at contact metamorphism. *Doklady Earth Sci.* **1997**. Vol. 353. N 3. P. 362—364 (in Russian).

Barsanov G. P. Minerals at Ilmeny nature reserve. Ural. branch USSR Acad. Sci., **1949**. 475 p.

Belkin H. E., Macdonald R., Grew E. S. Chevkinite-group minerals from granulite-facies metamorphic rocks and associated pegmatites of East Antarctica and South India. *Miner. Mag.* **2009**. Vol. 73. P. 149—164.

Boldyrev A. K., Betchtin A. G., Godlevsky M. N., Grigoriev D. P., Kisilev A. I., Levitsky O. D., Razumovsky N. K., Smirnov A. A., Sobolev V. S., Coloviev S. P., Uspensky N. M., Chernych V. V., Chatalov E. T., Shafranovsky I. I. Mineralogy. Moscow; Leningrad: ONTI, **1938**. 1136 p. (in Russian).

Bonatti S. Chevkinite, perrierite and epidotes. *Amer. Miner.* **1959**. Vol. 44. P. 115—137.

Bonatti S., Gottardi G. Nuovi dati sulla perrierite. *R. C. Soc. Mineral. Ital.* **1954**. Vol. 10. P. 208—225.

Carlier G., Lorand J.-P. Zr-rich accessory minerals (titanite, perrierite, zirconolite, baddeleyite) record strong oxidation associated with magma mixing in the South Peruvian potassic province. *Lithos.* **2008**. Vol. 104. P. 54—70.

Cryzanovsky V. I. Chevkinite from Ilmeny mountains. *Proc. Russ. Acad. Sci. VI ser.* **1924**. Vol. 18. N. 12—18. P. 321—326 (in Russian).

Eremenko G. K., Eremenko E. I. Calc-silicate hornfels at Au-Dag. *Dokl. Acad. Sci. Ukr. SSR. Ser. B.* **1972**. N 7. P. 585—589 (in Russian).

Ganseev A. A., Grechishev O. K. New genetic type of the rare metals alcaly granites at Madagascar. *Russian Geol. Geophys.* **2003**. Vol. 44. N 6. P. 539—553 (in Russian).

Geochemistry, moneralogy and genetic types of the rare elements deposits (ed. K. A. Vlasov). Vol. 2. Moscow: Nauka, **1964**. 830 p. (in Russian).

Haggerty S. E., Mariano A. N. Strontian loparite and strontiochevkinite: Two new minerals in rheomorphic fenites from the Paranfi Basin carbonatites, South America. *Contrib. Mineral. Petrol.* **1983**. Vol. 84. P. 365—381.

Halleran A. A. D., Russell J. K. REE-bearing alkaline pegmatites and associated light REE-enriched fenites at Mount Bisson, British Columbia. *Econ. Geol.* **1996**. Vol. 91. P. 451—459.

Heinrich E. W. Mineralogy and geology of radioactive raw materials. New-York: MacGraw-Hill, **1958**. 614 p.

- Ito J., Arem J. E. Chevkinite and perrierite: synthesis, crystal growth and polymorphism. *Amer. Mineral.* **1971**. Vol. 56. P. 307—319.
- Izett G. A., Wilcox R. E. Perrierite, chevkinite, and allanite in upper Cenozoic ash beds in the western United States. *Amer. Miner.* **1968**. Vol. 53. P. 1558—1567.
- Jaffe H. W., Evans H. T., Chapman R. W. Occurrence and age of chevkinite from the Devil's Slide fayalite-quartz syenite near Stark, New Hampshire. *Amer. Miner.* **1956**. Vol. 41. P. 474—487.
- Kapustin Yu. L. Chevkinite from fenites in alcaly intrusions of the Eastern Tuva. *Proc. Miner. Museum RAS.* **1987**. Vol. 34. P. 71—75 (in Russian).
- Kaufman A., Jaffe H. Chevkinite from Arizona. *Amer. Miner.* **1946**. Vol. 31. P. 582—588.
- Lacroix A. La tscheffkinite de Madagascar. *Bull. Soc. Fran. Minér.* 1915. Vol. XXXVIII. P. 106.
- Lagorio A. E. About geology at Crimea. *Proc. Warsaw. Univ.* **1887**. N 5. P. 1—16. N 6. P. 17—48.
- Larsen A. O., Andersen F., Berge S. A., Burvald I., Dahlgren S., Larsen K. E. The Langesundsfjord. History, geology, pegmatites, minerals. Bode Verlag GmbH: Salzhemendorf, Germany. **2010**. 279 s.
- Lazarenko E. K., Lavrinenko LF Φ ., Bachinskaya N. I. Mineralogy of the Priazovie. Kiev: Naukova Dumka, **1981**. 431 p. (in Russian).
- Luchitsky V. I. Petrography of Crimea. Petrography Soviet Union. Ser. 1. Regional petrography. N 8. Moscow; Leningrad: USSR Acad. Sci., **1939**. 98 p. (in Russian).
- Lyachovich V. V. Accessory minerals in granitoids of Soviet Union. Moscow: Nauka, **1967**. 447 p. (in Russian).
- Macdonald R., Bagin'ski B., Dzierz'anowski P., Fettes D. J., Upton B. G. J. Chevkinite-group minerals in UK Palaeogene granites: Underestimated REE-bearing accessory phases. *Canad. Miner.* **2013**. Vol. 51. P. 333—347.
- Macdonald R., Bagin'ski B., Kartashov P., Zozulya D., Dzierz'anowski P. Chevkinite-group minerals from Russia and Mongolia: new compositional data from metasomatites and ore deposits. *Miner. Mag.* **2012**. Vol. 76. P. 535—549.
- Macdonald R., Belkin H. E. Compositional variation in minerals of the chevkinite group. *Miner. Mag.* **2002**. Vol. 66. P. 1075—1098.
- Macdonald R., Marshall A. S., Dawson J. B., Hinton R. W., Hill P. G. Chevkinite-group minerals from salic volcanic rocks of the East African Rift. *Mineral. Mag.* **2002**. Vol. 66. P. 287—299.
- Marshall A. S., Hinton R. W., Macdonald R. Phenocrystic fluorite in peralkaline rhyolites, Olkaria, Kenya Rift Valley. *Miner. Mag.* **1998**. Vol. 62. P. 477—486.
- McDowell S. D. Chevkinite from the Little Chief granite porphyry stock, California. *Amer. Miner.* **1979**. Vol. 64. P. 721—727.
- Meister A. K. Materials at petrography of the Crimea. *Izvestija Geolkomu.* **1908**. Vol. 27. N 10. P. 669—706 (in Russian).
- Mills S. J., Kartashov P. M., Kampf A. R., Konev A. A., Koneva A. A., Raudsepp M. Cordylite-(La), a new mineral species in fenite from the Biraya Fe—Ree deposit, Irkutsk, Russia. *Canad. Miner.* **2012**. Vol. 50. P. 1281—1290.
- Morozova E. B., Sergeev S. A., Sufiev A. A. U-Pb zircon (Shrimp) age of the Djidair intrusion as reference subject for geology at Crimea. *Vestnik SPbSU. Ser. 7. Geol. Geogr.* **2012**. N 4. P. 25—33 (in Russian).
- Muhling J. R., Suvorova A. A., Birger R. The occurrence and composition of chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce) in tholeiitic intrusive rocks and lunar mare basalt. *Amer. Miner.* **2014**. Vol. 99. P. 1911—1921.
- Murata K. L., Rose H. I., Carron M. K., Glass J. J. Systematic variations of rare earth elements in cerium-rich minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1957**. Vol. 11. P. 141—161.
- Muratov M. V. Geology of Crimea peninsula. Moscow: Nedra, **1973**. 192 p. (in Russian).
- Papoutsas A. D., Pe-Piper G. The relationship between REE-Y-Nb-Th minerals and the evolution of an A-type granite, Wentworth Pluton, Nova Scotia. *Amer. Miner.* **2013**. Vol. 98. P. 444—462.
- Ploshko V. V., Sidenko O. G., Ivanov V. I., Sukach V. S. Association of the picrites and quartz diabases of Crimea. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1979**. Vol. 244. P. 442—445 (in Russian).
- Popov S. P. Mineralogy of Crimea. Moscow: USSR Acad. Sci., **1938**. 352 p. (in Russian).
- Reed S. J. B. Electron microprobe and scanning electron microscopy at geology. Cambridge: University Press, **2005**. 190 p.
- Ridolfi F., Renzulli A., Santi P., Upton B. G. J. Evolutionary stages of crystallization of weakly peralkaline syenites: evidence from ejecta in the plinian deposits of Agua de Pau volcano (São Miguel, Azores Islands). *Miner. Mag.* **2003**. Vol. 67. P. 749—767.
- Savelieva V. B., Karmanov N. S. Rare earths' minerals of alkaline metasomatites in the Main Sayan Fault zone. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2008**. Vol. 137. N 2. P. 31—52 (in Russian).

- Scaillet B., Macdonald R. Phase relations of peralkaline silicic magmas and petrogenetic implications. *J. Petrol.* **2001**. Vol. 42. P. 825—845.
- Segalstad T. V., Larsen A. O. Chevkinite and perrierite from the Oslo region, Norway. *Amer. Miner.* **1978**. Vol. 63. P. 499—505.
- Sokolova E., Hawthorne F. C., Ventura G. della, Kartashov P. M. Chevkinite-(Ce): crystal structure and the effect of moderate radiation-induced damage on site-occupancy refinement. *Canad. Miner.* **2004**. Vol. 42. P. 1013—1025.
- Sørensen H. The agpaite rocks: an overview. *Miner. Mag.* **1997**. Vol. 61. P. 485—498.
- Spiridonov E. M., Fedorov T. O., Ryachovsky V. M. Magmatism of Rocky Crimea. Article 1 and 2. *Bull. MOIP. Geology.* **1990**. Vol. 65. N. 4. P. 119—134, N 6. P. 102—112 (*in Russian*).
- Spiridonov E. M., Filimonov S. V., Korotaeva N. N., Semikolennykh E. S. Zirconolite, baddeleyite, chevkinite, ilmenite, zircon, thorite, allanite, monazite of the island arc quartz anorthite — bytownite gabbro-norite-dolerites within the Aju-Dag intrusion, Rocky Crimea. *Fedorov session 2016*. Saint Petersburg: LEMA, **2016**. P. 171—173 (*in Russian*).
- Spiridonov E. M., Filimonov S. V., Semikolennykh E. S., Korotaeva N. N., Krivitskaya N. N. Zirconolite, baddeleyite, zircon and thorite of the island arc quartz gabbro-norite-dolerites within the Aju-Dag intrusion, Rocky Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* **2018**. N 6. P. 538—548.
- Troll V. R., Sachs P. M., Schmincke H.-U., Sumita M. The REE-Ti mineral chevkinite in comenditic magmas from Gran Canaria, Spain: a SYXRF-probe study. *Contrib. Mineral. Petrol.* **2003**. Vol. 145. P. 730—741.
- Vlach S., Gualda G. Allanite and chevkinite in A-type granites and syenites of the Graciosa Province, southern Brazil. *Lithos.* **2007**. Vol. 97. P. 98—121.
- Young E. J., Powers H. A. Chevkinite in volcanic ash. *Amer. Miner.* **1960**. Vol. 45. P. 875—881.
- Zazicha B. V. Postmagmatic mineralization from granitoids of the Kamennykh Mogil (Priazovie). In: *Ore-forming environment on the inclusions in minerals*. Moscow: Nauka, **1972**. P. 178—184 (*in Russian*).

Поступила в редакцию
24 сентября 2018 г.