

УДК 549.618+552.321+550.42 (477.9)

**Тi ФЕРРИАЛЛАНИТ-(Ce), Ti И Ti-V АЛЛАНИТ-(Ce),
АЛЛАНИТ-(Ce), АЛЛАНИТ-(Y), REE ЭПИДОТ
В БИОТИТСОДЕРЖАЩИХ КВАРЦЕВЫХ ГАББРОИДАХ
И ПЛАГИОГРАНИТОИДАХ ОСТРОВОДУЖНОГО
ПЕРВОМАЙСКО-АЮДАГСКОГО КОМПЛЕКСА
ГОРНОГО КРЫМА**

© 2025 г. Э. М. Спиридонов^{a, *}, Г. Н. Овсянников^{a, c}, С. В. Филимонов^a,
Е. С. Койбагарова^b, Н. Н. Коротаева^a

^aМосковский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва ГСП-1, 119991 Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет,
В/О, пер. Декабристов, 16, Санкт-Петербург, 199155 Россия

^cИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Поступила в редакцию 13.02.2025 г.

После доработки 07.04.2025 г.

Принята к публикации 24.04.2025 г.

Описана уникальная ассоциация редкоземельных минералов группы эпидота и эволюция лантанидов и актинидов, титана и ванадия в их составе. Алланит-(Ce), нередко с ядром ферриалланита-(Ce), внешней зоной алланита-(Y) и оторочкой REE эпидота, слагает псевдоморфозы по чевкиниту-(Ce) и перрьериту-(Ce) и обособленные кристаллы. Они образуют сростания с биотитом и развиты рядом с ним в кварцевых габбронорит-долеритах и габбронорит-диоритах островодужного базитового гипабиссального первомайско-аюдагского комплекса среднеюрского — раннебайосского возраста Горного Крыма. Близкого состава зональный алланит-(Ce) с каймами REE эпидота развит в кварцевых диоритах и плагиогранитах того же комплекса, часто присутствует в гранофировых кварц-олигоклазовых сростаниях. Коричневого цвета обогащенный Ti ($\pm$ Th) ферриалланит-(Ce) слагает ядра в кристаллах обогащенного Ti ($\pm$ V) алланита-(Ce) коричневого цвета (до 4.9 мас. % TiO_2). Обогащенный титаном (до 3.5 мас. % TiO_2) алланит-(Ce), заместивший ильменит, экстремально богат ванадием (до 4.5 мас. % V_2O_3). На обогащенный титаном алланит-(Ce) вырос светлоокрашенный малотитанистый алланит-(Ce). Распределение лантанидов и иттрия в алланите-(Ce) и ферриалланите-(Ce): $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Y} > \text{Pr} > \text{Sm} \sim \text{Dy} \sim \text{Gd} > \text{Er} \sim \text{Tb}$. Внешние зоны кристаллов алланита-(Ce) и REE эпидот обычно относительно обогащены Nd, в них иногда $\text{Nd} > \text{La}$. Соотношение иттрия и лантанидов в алланите-(Y) специфичное: $\text{Y} > \text{Ce} \sim \text{Nd} \sim \text{Dy} \sim \text{Er} > \text{La} \sim \text{Gd} \sim \text{Yb}$. Алланит-(Ce) габброидов Крыма заметно богаче La, Ti, V и беднее Y, Sm, Gd в сравнении с алланитом-(Ce) плагиогранитоидов Крыма. Распределение лантанидов и иттрия в алланите-(Ce) плагиогранитоидов Крыма близко к стандартным гранитам, единственное существенное отличие — повышенное содержание Gd. Рассмотрены причины окраски и источники вещества для образования магматогенного крымского алланита. При процессах регионального метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации часть этого алланита заместил монацит-(Ce).

Ключевые слова: ферриалланит-(Ce), алланит-(Ce), алланит-(Y), REE эпидот, островодужные габброиды — плагиогранитоиды Горного Крыма

DOI: 10.31857/S0016752525080039, EDN: QFNBL

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные минералы группы эпидота — характерные акцессорные минералы кварцевых габброидов с биотитом и плагиогранитоидов островодужного базитового первомайско-аюдагского интрузивного комплекса в мезозоидах Горного Крыма. Рассмотрены уникальные парагенезы редкоземельных минералов группы эпидота: Ti ферриалланит-(Ce), Ti и Ti-V алланит-(Ce), алланит-(Ce), алланит-(Y), REE эпидот, которые в сростании с биотитом слагают псевдоморфозы по чевкиниту-(Ce), перрьериту-(Ce), ильмениту и обособленные кристаллы. Представлена эволюция лантанидов и иттрия, титана и ванадия в крымских магматогенных редкоземельных минералах группы эпидота в сравнении с мировыми типами.

Алланит (ортит) — распространенный акцессорный минерал магматических, метаморфических и метасоматических горных пород. Якоб Берцелиус в 1818 г. назвал этот минерал ортитом за ортогональную форму кристаллов (Кокшаров, 1848). В настоящее время принято название «алланит», которое дано в честь шотландского минералога Томаса Аллана (1777–1833) (Армбрустер и др., 2006).

Структуру минерала расшифровали Т. Уеда (Ueda, 1955); И. М. Руманова и Т. В. Николаева (1959). Структура алланита отвечает клиноцоизиту $\text{CaCaAlAl}_2[\text{O}/\text{OH}/\text{SiO}_4/\text{Si}_2\text{O}_7]$, где место атома Ca^{2+} занимают REE^{3+} , Y^{3+} , Sc^{3+} , место атома Al^{3+} занимают Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} ... — Ca (REE, Y)(Fe^{2+} , Mg, Mn) $\text{Al}_2[\text{O}/\text{OH}/\text{SiO}_4/\text{Si}_2\text{O}_7]$; Ca^{2+} замещают Sr^{2+} , Mn^{2+} и Pb^{2+} ; Al^{3+} — Fe^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} . Наиболее распространен алланит-(Ce), гораздо более редки алланит-(Y), алланит-(La), алланит-(Nd), алланит-(Sm); относительно распространен ферриалланит-(Ce), в составе которого $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}$ (Hobbs, 1889; Вернадский, 1914; Болдырев и др., 1936; Ферсман, 1940; Murata et al., 1957; Хвостова, 1962; Хейнрих, 1962; Frondel, 1964; Якубова, 1972; Gromet, Silver, 1983; Sawka et al., 1984; Fleischer, 1985; Deer et al., 1986; Burt, 1989; Chesner, Ettlinger, 1989; Pan, Fleet, 1991; Ercit, 2002; Holtstam, 2003; Giere, Sorensen, 2004; Армбрустер и др., 2006; Hoshino et al., 2006; Hanson, 2012; Alekseev et al., 2013; Pieczka et al., 2024).

Алланит — распространенный акцессорный минерал кремнекислых интрузивных и вулканических пород, в некоторых из них он образует вкрапленники (Вернадский, 1914; Smith et al., 1957; Хвостова, 1962; Якубова, 1972; Попова и др., 1980; Gromet, Silver, 1983; Sawka et al., 1984; Fleischer, 1985; Deer et al., 1986; Burt, 1989; Chesner, Ettlinger, 1989; Congdon, Nash, 1991; Barth et al., 1994; Cassilas et al.,

1995; Ercit, 2002; Giere, Sorensen, 2004; Hoshino et al., 2006; Спиридонов и др., 2013; Alekseev et al., 2013; Губин, Хиллер, 2014); гранитных пегматитов (Lacroix, 1910; Вернадский, 1914; Болдырев и др., 1936; Лабунцов, 1939; Ферсман, 1940; Барсанов, 1949; Murata et al., 1957; Хвостова, 1962; Попова и др., 1980; Fleischer, 1985; Deer et al., 1986; Barth et al., 1994; Cassilas et al., 1995; Ercit, 2002; Orlandi, Passero, 2006; Prol-Ledesma et al., 2012; Губин, Хиллер, 2014); кварцосодержащих габброидов (Smith et al., 1957; Хвостова, 1962; Якубова, 1972; Ercit, 2002); карбонатитов, сиенитов, нефелиновых сиенитов, щелочных пегматитов, фенитов (Murata et al., 1957; Smith et al., 1957; Попова и др., 1980; Fleischer, 1985; Giere, Sorensen, 2004; Hanson, 2012); магнезиальных и известковых скарнов (Holtstam, 2013; Smith et al., 2002); пропилитов; метаморфических пород амфиболитовой, гранулитовой и эклогитовой фаций, фации голубых сланцев (Treloar, Charnley, 1987; Pan, Fleet, 1991; Schandl, Gorton, 1991; Finger et al., 1998; Wing et al., 2003; Mulrooney, Rivers, 2005; Philpotts, Ague, 2009); жил альпийского типа (Gramaccioli, 1978); метакимберлитов пренит-пумпеллитовой фации (Путинцева, Спиридонов, 2016). В. И. Вернадский показал, что существует два типа гранитоидов: обогащенные Ca содержат алланит и апатит, бедные Ca — монацит (Вернадский, 1914).

Во всех этих образованиях редкоземельный состав алланита-(Ce) обычно довольно устойчив: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} \gg \text{Pr} > \text{Sm} > \text{Gd}$. Содержания иных редкоземельных элементов, иттрия и урана обычно невелики; содержания тория — от следов до 1, редко до 5 мас. % и выше. Алланит, обогащенный La или Nd, а также Th и U, развит в гранитных пегматитах. Ядра кристаллов такого алланита обычно метамиктные, нередко метамиктен весь объем кристаллов пегматитового алланита. Ферриалланит — характерный минерал тех жил альпийского типа, которые были сформированы при повышенном окислительном потенциале. Кристаллы алланита практически повсеместно зональные, их ядра обогащены лантанидами, внешние зоны обогащены Ca и/или Y, оторочки слагает REE эпидот.

ГЕОЛОГИЯ ГОРНОГО КРЫМА

Мезозоида Горного Крыма — это составная часть альпийско-гималайского покровно-складчатого пояса (Хаин, 1984). Горный Крым в мезозое — окраина океана Тетис. В триасе — ранней юре — это пассивная окраина Русской платформы. В средней юре — это активная окраина Русской платформы с островной андезитовой вулканической дугой и немалым количеством мелких интрузивов габброидов и плагиогранитоидов

первомайско-аюдагского комплекса (Спиридонов и др., 1990). Мезозойды Горного Крыма состоят из Лозовской и Горно-Крымской тектонических зон, которые слагают сложноскладчатые толщи флиша позднего триаса – ранней юры, несогласно перекрытые более молодыми терригенно-карбонатными и угленосными отложениями средней юры, смятыми в более простые складки (Милеев и др., 2009). Флиш таврической и эскиординской серий прорван и метаморфизован гипабиссальными интрузивами раннебайосского первомайско-аюдагского интрузивного комплекса, прорван и перекрыт вулканитами позднебайосской бодракско-карадагской вулканической серии (Павлинов, 1946; Лебединский, 1962; Фирсов, 1963; Багдасарян, Лебединский, 1967; Лебединский, Соловьев, 1988; Спиридонов и др., 1990; Никитин, Болотов, 2007; Латышев, Панов, 2008; Морозова и др., 2012). Первомайско-аюдагский габброидный комплекс – это островодужная плагио-оцерцит – габбронорит-долерит – габбронорит-диорит – кварцеводиорит – плагиогранитная формация. Интрузивы комплекса: куполообразные штоки, дайко- и силлообразные – Аю-Дагский, Партенитские, Балаклавские, Чамны-Бурун, Курцовские, Лозовской, Джидайский, Донузоран, Лебединский, Кушнарёвский (Первомайский)... Их образуют преобладающие анортит-битовнитовые габбронорит-долериты от оливиновых до кварцевых, кумулятивные плагиооцерциты, кварцевые габбронорит-диориты, кварцевые диориты, плагиограниты, в том числе гранофировые; в краевых частях интрузивов породы мелко- и тонкозернистые, порфиро-

видные и резко порфировидные, нередко миндалекаменные (Лагорио, 1887; Лучицкий, 1939; Павлинов, 1946; Кравченко, 1958а, б; Спиридонов и др., 1990, 2018, 2019а, 2019б, 2021а, 2023; Овсянников и др., 2024).

Допозднеюрские образования Горного Крыма были перекрыты осадочными толщами поздней юры мощностью до 5 км и более, тектонизированы и захвачены региональным низкоградным метаморфизмом позднеюрского возраста в условиях цеолитовой, затем – пренит-пумпеллиитовой и вновь – цеолитовой фаций; фации выделены по аналогии с данными в работе (Philpotts, Ague, 2009); при этом минеральный состав магматических пород первомайско-аюдагского комплекса был существенно преобразован (Спиридонов и др., 1990; Спиридонов, 2018; Спиридонов, Овсянников, 2024). Габброиды интрузива Лебединского, метаморфизованные в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, пересечены маломощными дайками кайнотипных керсутитовых лампрофиров мелового возраста (Спиридонов и др., 2021б).

ИНТРУЗИВЫ ПЕРВОМАЙСКО-АЮДАГСКОГО КОМПЛЕКСА

На рис. 1 приведена схема расположения интрузивов первомайско-аюдагского комплекса, которые описаны ниже.

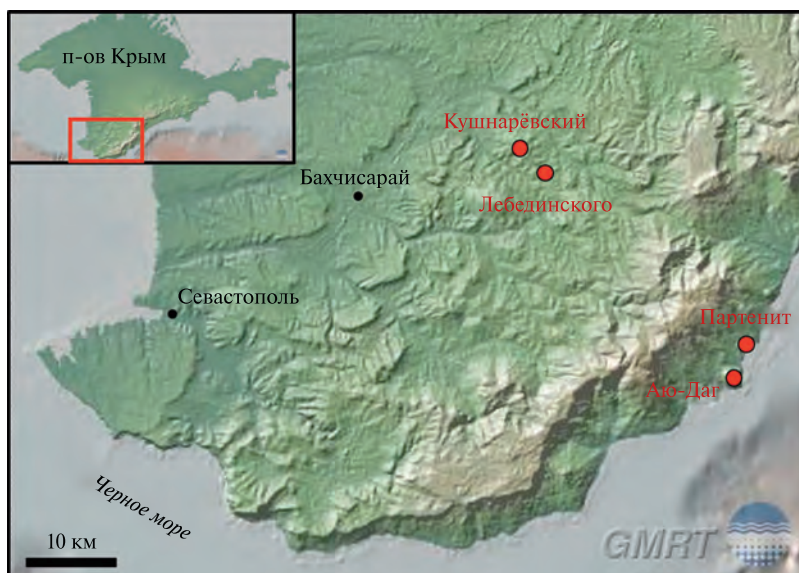


Рис. 1. Карта Горного Крыма с отмеченными на ней интрузивами первомайско-аюдагского комплекса: Аю-Даг, Партенит, Кушнарёвский (Первомайский) и Лебединского.

Штокообразный интрузив Аю-Даг

Аю-Даг (Медведь-гора) расположен в Южно-Крымской тектонической зоне. Это двухкупольный габброидный интрузив размером $2,4 \times 2$ км, одно из типичных островодужных магматических образований Горного Крыма. Интрузив внедрился механически активно, раздвигая и пронизывая дислоцированную толщу флиша таврической серии. В бухте Панаир от основного тела интрузива на юг в породы рамы отходят субгоризонтальные жилы — апофизы мощностью от первых сантиметров до 13 м, сложенные мелкозернистыми порфировидными и резко порфировидными габброидами. Вдоль контактов жил — апофиз — развиты породы зоны закалки, в том числе с вкрапленниками анортита и оливина (Спиридонов и др., 2018). Интрузив окружен узким (до 5–8 м) ореолом роговиков (в том числе узловатых с андалузитом, кордиеритом) и кварцитопесчаников (Лучицкий, 1939). Ксенолиты флиша таврической серии слагают роговики пироксеновой фации, апосидеритовые — с феррогортонолитом (Еременко, Еременко, 1972). Интрузив сложен среднезернистыми, средне-крупнозернистыми, реже пегматоидными или порфировидными средне-мелкозернистыми анортит-битовнитовыми кварцевыми и кварцсодержащими габбронорит-долеритами, кварцевыми габбронорит-диоритами и кварцевыми диоритами с небольшими шлирами и жилами гранодиоритов и плагиогранитов, нередко гранофировых (Павлинов, 1946; Кравченко, 1958а, 1958б; Спиридонов и др., 1990, 2018, 2019а, 2019б, 2023). Для габброидов характерны полосчатые и складчатые текстуры магматического течения, выраженные чередованием полос, богатых анортитом и битовнитом, и полос, богатых пироксенами и титаномagnetитом. Широко распространены массивные габброиды средне- и крупнозернистые, редко пегматоидные, с одной стороны, и мелко-среднезернистые — с другой. Не менее широко развиты такситовые и шлирово-такситовые габброиды с хаотичным чередованием разнозернистых меланократовых, мезократовых и лейкократовых участков неправильной формы. Габброиды Аю-Дага повсеместно содержат мелкие гнезда кварца и гранофировые кварц-олигоклазовые сростания. В отдельных участках количество и размер таких гнезд увеличивается, вплоть до преобладания. Соответственно, состав пород меняется от габброноритового через габбро-диориты и кварцевые диориты до гранофировых плагиогранитов. Очевидно, поэтому в ранних работах (Лучицкий, 1939 и др.) отмечено широкое развитие в составе интрузива Аю-Даг гранитоидных пород. Преобладание на Аю-Даге габброидов

с обилием анортита установил С. М. Кравченко (1958а, 1958б).

Габброиды Аю-Дага пересечены пологими, наклонными и крутопадающими дайками базитов с зонами закалки. Дайки слагают микрогаббронориты, габбро-порфириты, долериты двупироксеновые, амфибол-двупироксеновые и оливин-содержащие.

Штоки Партенита

Основное интрузивное тело Аю-Дага сопровождают расположенные восточнее многочисленные сателлиты и отшнурованные небольшие штоки размером от первых десятков метров до $200\text{--}300 \times 100\text{--}150$ метров долготного и северо-восточного простирания (Партенит, Медвежата и иные). Они сложены в основном среднезернистыми габбронорит-долеритами и габбронорит-диоритами, кварцевыми и кварцсодержащими, реже кварцевыми диоритами. Широко развиты порфировидные и резко порфировидные породы, мелкозернистые до тонкозернистых, нередко миндалекаменные (Павлинов, 1946; Кравченко, 1958а, 1958б и др.)

Силлообразный интрузив Лебединского

Расположен на западном склоне Симферопольского поднятия, в 5 км от пос. Трудолюбовка вверх по течению р. Бодрак, в пределах геологического полигона МГУ. Пластовые тела магматических пород основного состава в верховьях Бодрака известны со времен П. Палласа (Лагорио, 1887). К северу от р. Бодрак развиты три силлообразных интрузива, субсогласных пластам флиша таврической серии, залегающим почти вертикально на крыле крупной складки. В том месте, где в русле р. Бодрак вскрыт силлообразный интрузив Лебединского (т.н. Перекат), интрузивное тело сечет ороговикованный флиш таврической серии почти вкрест залегания; в него отходят апофизы габброидов мощностью до 20 см. Мощность тела габбронорит-долеритов составляет 4–7 м, длина — 1500–2000 м. Центральные части тел слагают среднезернистые, массивные оливинные габбронорит-долериты с участками и шлирами меланократовых оливинных габбронорит-долеритов до плагиолерцолитов, а также безоливиновых и кварцсодержащих пород с биотитом. Именно последние содержат алланит. Зоны закалки мощностью до 1 м слагают порфировидные и резко порфировидные тонкозернистые породы с вкрапленниками анортита, битовнита и оливина, часто миндалекаменные.

Штокообразный интрузив Кушнарёвский (Первомайский)

Кушнарёвский (Первомайский) интрузив расположен на западном склоне Симферопольского

поднятия в пределах геологического полигона МГУ, среди ветвей субширотного крутопадающего Бодракского разлома, по которому граничат таврическая и эскиордынская флишевые толщи (Милеев и др., 2009). Размер интрузива достигает 800×300 м. Интрузив дифференцированный. Вскрытая карьером нижняя часть интрузива сложена мелко- и средне-мелкозернистыми габбронорит-долеритами с единичными кристаллами оливина, кварцсодержащими и кварцевыми габбронорит-долеритами и габбронорит-диоритами, в том числе с биотитом. Выше они переходят в пироксенсодержащие биотит-роговообманковые кварцевые диориты со шлирами плагиогранитов. Среди габброидов развиты редкие крутопадающие жилы кварцевых диоритов – плагиогранитов с округлыми ксенолитами кварцевых габбронорит-долеритов. Верхнюю часть интрузива составляют биотитовые плагиограниты от меланократовых до лейкократовых, местами гранофировые. Породы интрузива рассечены дайками оливиновых базальтов и андезитов позднебайосского бодракского субвулканического комплекса (Спиридонов и др., 1990). На выветрелые кушнарёвские плагиограниты вырос коралловый риф раннемелового возраста (Лагорио, 1887; Никитин, Болотов, 2007).

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД ПЕРВОМАЙСКО-АЮДАГСКОГО КОМПЛЕКСА

Минеральные ассоциации (МА) габброидов и плагиогранитоидов комплекса отвечают реакционному ряду Н.Л. Боуэна (Спиридонов и др., 2023): 1 МА – Mg оливин I, алюмомагнезиохромит; 2 МА – анортит, оливин II, алюмохромит до хромтитаномагнетита; 3 МА – битовнит, субкальциевый авгит, Mg авгит, бронзит, пижонит, армолколлит ($\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$)($\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}$) $_2\text{O}_3$; 4 МА – лабрадор, Fe авгит гиперстен, Mg ильменит, титаномагнетит-I, бадделеит ZrO_2 , чевкинит-(Ce) (REE, Ca, Th, Y) $_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_1\text{Ti}_4[\text{O}_4/\text{Si}_2\text{O}_7]_2$, перрьерит-(Ce) (REE, Ca, Y) $_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_1\text{Ti}_4[\text{O}_4/\text{Si}_2\text{O}_7]_2$, цирконолит (Ca, Y, REE)Zr($\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}$) $_2\text{O}_7$; в ряде кристаллов чевкинита-(Ce) и перрьерита-(Ce) преобладает магний; в ряде кристаллов цирконолита преобладает иттрий; 5 МА – андезин, титаномагнетит II, ильменит, паргасит до эденита; 6 МА – олигоклаз, кварц, биотит I, ильменит, алланит-(Ce) I, ферриалланит-(Ce), алланит-(Y), REE эпидот I, циркон I; 7 МА – альбит – олигоклаз, кварц, кварц-полевошпатовые гранофировые сращения, биотит II, циркон II, алланит-(Ce) II, REE эпидот II. Чевкинит-(Ce) реликтовых включений в алланите беден Mg, его состав, мас. %, n = 4: SiO_2

19.65 (19.38–20.04); TiO_2 19.08 (18.74–19.47); ZrO_2 0.72 (нпо – 1.60); Al_2O_3 1.64 (1.25–2.00); Fe_2O_3 4.48 (1.95–7.19); FeO 5.40 (3.43–6.44); MnO 0.11 (нпо – 0.17); MgO 0.09 (нпо – 0.25); Sc_2O_3 0.41 (0.34–0.45); La_2O_3 10.88 (8.68–12.40); Ce_2O_3 21.84 (21.15–22.32); Pr_2O_3 1.75 (1.47–2.04); Nd_2O_3 6.89 (6.15–7.95); Sm_2O_3 0.42 (нпо – 0.70); Gd_2O_3 0.42 (нпо – 0.62); ThO_2 2.24 (1.61–2.72); CaO 3.20 (2.58–3.79); Na_2O 0.30 (0.26–0.33); сумма 99.52, чему соответствует формула $[\text{Ce}_{1.5-1.7}\text{La}_{0.6-0.9}\text{Nd}_{0.5-0.6}\text{Pr}_{0.1}(\text{Gd} + \text{Sm})_{0.1} \times \text{Y}_{0.1-0.2}\text{Sc}_{0.1}\text{Ca}_{0.6-0.8}\text{Na}_{0.1-0.4}](\text{Fe}^{2+}_{0.6-1}\text{Mg}_{0-0.1}\text{Fe}^{3+}_{0-0.4})_1 \times (\text{Ti}_{0.8-0.9}\text{Fe}^{3+}_{0.3-0.7}\text{Al}_{0.2-0.4}\text{Zr}_{0-0.2})_2\text{Ti}_2[(\text{Si}_{3.9-4}\text{Al}_{0.1-0.4})_4\text{O}_{22}]$ (Спиридонов и др., 2019б). Перрьерит-(Ce) реликтовых включений в алланите беден Mg, его состав, мас. %, n = 7: SiO_2 20.33 (20.08–20.92); TiO_2 19.27 (18.96–19.61); ZrO_2 2.19 (1.66–2.85); Al_2O_3 3.13 (2.93–3.50); Fe_2O_3 5.50 (4.84–6.32); FeO 1.84 (1.87–2.55); MnO нпо; MgO 0.69 (0.62–0.75); Sc_2O_3 0.38 (0.30–0.49); Y_2O_3 0.79 (0.58–1.29); La_2O_3 10.04 (9.52–10.72); Ce_2O_3 20.04 (19.89–21.01); Pr_2O_3 1.40 (1.30–1.51); Nd_2O_3 5.68 (4.73–6.75); Sm_2O_3 0.31 (нпо – 0.52); Gd_2O_3 0.29 (нпо – 0.57); ThO_2 1.66 (0.54–2.96); CaO 5.01 (5.32–6.28); Na_2O 0.30 (0.25–0.39); сумма 99.85 (98.83–100.89), формула отвечает $[\text{Ce}_{1.3-1.5}\text{La}_{0.7-0.8}\text{Nd}_{0.3-0.5}\text{Pr}_{0.1}(\text{Gd} + \text{Sm})_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{Sc}_{0.1}\text{Ca}_{1.1-1.3} \times \text{Na}_{0.1-0.4}](\text{Fe}^{2+}_{0.4-0.5}\text{Fe}^{3+}_{0.2-0.4}\text{Mg}_{0.2})_1(\text{Al}_{0.5-0.7}\text{Ti}_{0.3-0.8} \times \text{Fe}^{3+}_{0.3-0.9}\text{Zr}_{0.1-0.3})_2\text{Ti}_2[(\text{Si}_{3.9-4}\text{Al}_{0.1-0.4})(\text{O}_{21.4-22}\text{OH}_{0.6-0.2})_{22}]$ (Спиридонов и др., 2019б). Апатит присутствует в 3–7 МА, редкие пирротин и халькопирит – в 3–6 МА.

Интрузивные породы содержат заметное количество реститовых циркона и торита, некоторые кристаллы этого циркона обогащены иттрием; реститовые циркон и торит интенсивно растворялись в базитовом расплаве комплекса (Спиридонов и др., 2018).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучен алланит и REE эпидот обширной коллекции биотитсодержащих кварцевых габброидов и плагиогранитоидов интрузивов Аю-Даг, Партенит, Лебединского и Кушнаревский (Первомайский); метамиктных среди них нет. Микрофотографии выполнены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axioplan 2. Фотографии в режиме отраженных электронов и исследование химического состава редкоземельных минералов группы эпидота выполнены в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на электронном сканирующем микроскопе JSM IT-500 («Jeol», Japan)

с энергодисперсионным спектрометром X-Max^N («Oxford Instruments», GB), аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева. Измерения проведены при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 0.7 нА. Время накопления спектра — 100 с. Систематическая погрешность измерения главных (более 10 %) компонентов не превышает 1 относительного процента. Для содержаний от 1 до 10 % относительная ошибка находится в пределах 5 %. Анализы выполнены с использованием в качестве стандартов синтетических фосфатов индивидуальных лантанидов и иттрия: YPO₄ (Y L), CePO₄ (Ce L), LaPO₄ (La L), NdPO₄ (Nd L), PrPO₄ (Pr L), SmPO₄ (Sm L), EuPO₄ (Eu L), GdPO₄ (Gd L), TbPO₄ (Tb L), DyPO₄ (Dy L), ErPO₄ (Er L), YbPO₄ (Yb M), а также — волластонита (Ca K, Si K), микролина (Al K), диоксида (Mg K), Fe₂O₃ (Fe K), MnTiO₃ (Mn K, Ti K), ThO₂ (Th M). С учетом наложения спектральных линий индивидуальных лантанидов показана высокая надежность полученных аналитических данных. Так, для одного из анализов крымского алланита при учете наложений аналитических линий иных лантанидов получены следующие оценки: Ce 10.04 ± ± 0.004 мас. %, La 4.97 ± 0.003; Nd 2.50 ± 0.000;

Pr 0.69 ± 0.000; Sm 0.43 ± 0.008; Gd 0.43 ± 0.10; Dy 0.39 ± 0.05 мас. %. Расчет формул минералов группы эпидота проведен по стандартному варианту формулы клиноцоизита, оценка содержания Fe²⁺ и Fe³⁺ — по балансу зарядов. Нумерация анализов в таблицах и на рисунках единая, сквозная.

ФЕРРИАЛЛАНИТ-(Ce), АЛЛАНИТ-(Ce), АЛЛАНИТ-(Y), REE ЭПИДОТ В БИОТИТ-КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ГАББРОИДАХ

Интрузив Аю-Даг

Редкоземельные минералы группы эпидота развиты в кварцсодержащих габбронорит-долеритах и габбронорит-диоритах, где слагают псевдоморфозы по чевкиниту-(Ce) (рис. 2а) и перрьериту-(Ce) (рис. 2б, 2г, 3а) и обособленные кристаллы (рис. 2б, 3б, 3в, 3г, 4), обычно в сростаниях с биотитом и около его выделений. Большинство кристаллов алланита имеет зональное (рис. 3б) и секториально-зональное строение (рис. 3г, 4в, 4г) и окружены зональными оторочками REE эпидота (рис. 2б, 2в, 4в); незональные кристаллы алланита-(Ce)

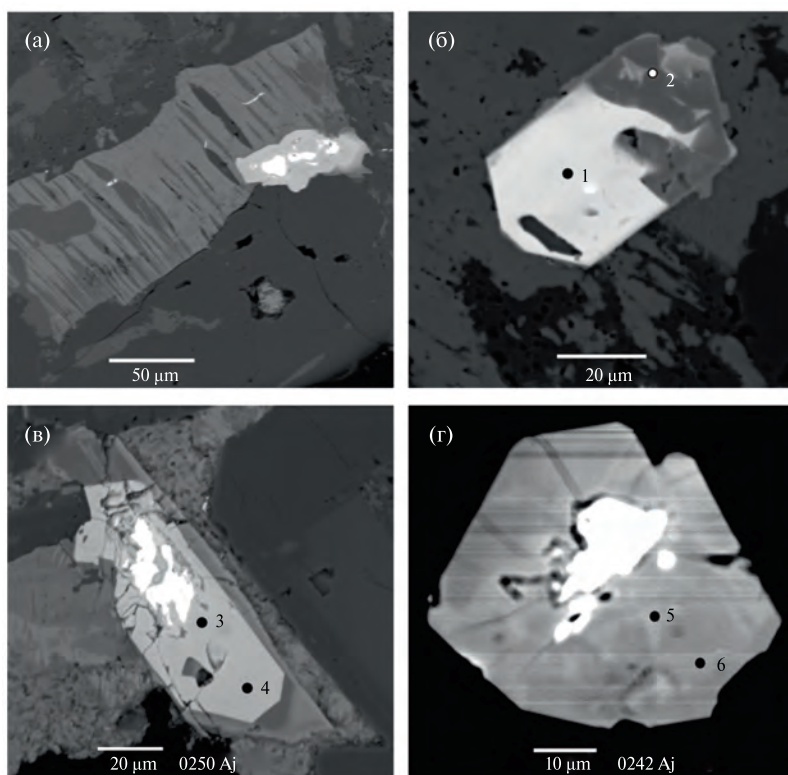


Рис. 2. Биотитсодержащие кварцевые габбронорит-долериты юго-запада причерноморской полосы интрузива Аю-Даг: (а) — алланит-(Ce) (светло-серый) с реликтами чевкинита-(Ce) (бе-лый) в сростании с биотитом; (б) — кристалл алланита-(Ce) (светлый, ан. № 1, 2) с оторочкой REE эпидота (серый); (в) — кристалл алланита-(Ce) (светло-серый, ан. № 3, 4) с реликтами перрьерита-(Ce) (белый), оторочка зонального REE эпидота (серый); (г) — алланит-(Ce) (серый разных оттенков, ан. № 5, 6) с реликтами перрьерита-(Ce) (белый). BSE image.

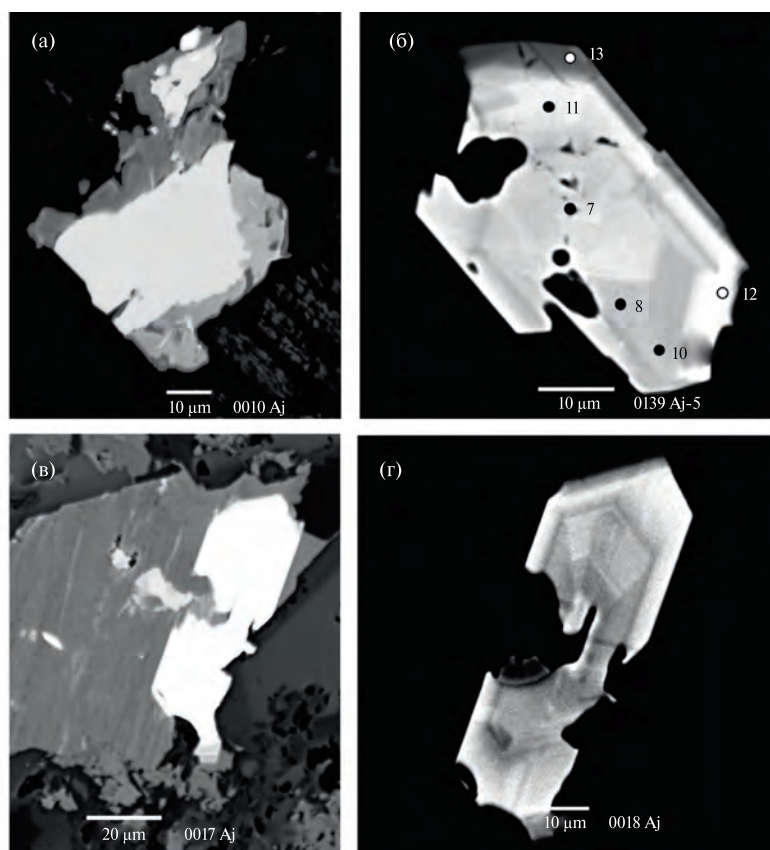


Рис. 3. Биотитсодержащие кварцевые габбронорит-долериты и габбронорит-диориты центра причерноморской полосы интрузива Аю-Даг, запад бухты Панаир: (а) — алланит-(Ce) (серый) слагает кайму замещения вокруг перрьерита-(Ce) (белый); (б) — сложно зональный кристалл алланита: Ti ферриалланит-(Ce) (ан. № 7), алланит-(Ce) (ан. № 8–12), алланит (Y) (ан. № 13); (в, г) — секториально-зональный кристалл алланита-(Ce) в биотите. BSE image.

редки (рис. 4а). Центральные зоны кристаллов слагает коричневый в проходящем свете алланит-(Ce), обогащенный Ti (до 3.6 мас. % TiO_2) и Fe^{2+} (ан. № 1, 3, 4–6, табл. 1; № 11–19, табл. 3). Состав обогащенного титаном алланита-(Ce) в различных частях интрузива Аю-Даг устойчив: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} \gg \text{Pr} \gg \text{Sm} \sim \text{Gd} \sim \text{Dy}$; $\text{Fe}^{2+} \gg \text{Fe}^{3+}$. Вариации состава алланита-(Ce) на северо-востоке (табл. 3) и на юго-западе интрузива (табл. 1): Ce_2O_3 12.2–13.8 и 11.4–13.7 мас. %; La_2O_3 7.4–11.0 и 5.2–8.5 %; Nd_2O_3 1.7–4.2 и 3.3–4.5 %; Pr_2O_3 0.4–1.1 и 0.8–1.2 %; Sm_2O_3 до 0.3 и до 0.4 %; Gd_2O_3 до 0.3 и до 0.4 %; ThO_2 до 0.7 % и до 0.7 %; TiO_2 2.5–3.6 и 2.4–3.4 %; V_2O_3 0.5–0.7 и 0.4–0.6 %. Алланит-(Ce) на юго-западе интрузива немного богаче Y. Богатый Ti алланит-(Ce), замещивший ильменит (рис. 4б), селективно обогащен V, содержит 3.2–4.4 мас. % V_2O_3 (ан. № 18–19, табл. 3). Реже в центре кристаллов развит коричневый в проходящем свете ферриалланит-(Ce), обогащенный Ti (ан. № 7, табл. 2), который окружен обогащенным Ti алланитом-(Ce). Распределение лантанидов в ферриалланите-(Ce) несколько иное: $\text{Ce} \gg \text{La} \sim \text{Nd} \gg \text{Pr} > \text{Sm} \sim \text{Gd}$; содержание Y,

Sc, Th такое же, как в титанистом алланите-(Ce); $\text{Fe}^{3+} \sim \text{Fe}^{2+}$. Светло-коричневый до бесцветного алланит-(Ce) с невысоким содержанием Ti окружает ядра обогащенного Ti алланита-(Ce) (рис. 3б, ан. № 8–12, табл. 2) и слагает центральные части многих обособленных кристаллов алланита. Состав бедного Ti алланита-(Ce) устойчив по всему интрузиву Аю-Даг. Минерал содержит 10.2–11.6 мас. % Ce_2O_3 ; 4.3–5.6 % La_2O_3 ; 3.7–5.4 % Nd_2O_3 ; 0.8–1.3 % Pr_2O_3 ; 0.4–1.1 % Sm_2O_3 ; 0.3–0.8 % Gd_2O_3 ; 0.2–1.6, чаще 0.2–0.6 % TiO_2 ; 0.2–0.6 % V_2O_3 , $\text{Fe}^{2+} \gg \text{Fe}^{3+}$. Распределение лантанидов: $\text{Ce} \gg \text{La} \sim \text{Nd} \gg \text{Pr} \sim \text{Sm} \sim \text{Gd}$. Бедный Ti алланит-(Ce) заметно богаче Y — до 1–1.5 мас. % и Sc — до 0.4 мас. %, чем Ti алланит-(Ce). В целом из 18 анализов алланита-(Ce) самарий обнаружен в 13, гадолиний — в 12, диспрозий — в 2 анализах.

Алланит-(Y), впервые установленный в Крыму, слагает оторочки кристаллов титанистого и низкотитанистого алланита-(Ce) (рис. 3б, 4в; ан. № 13, табл. 2). Алланит-(Y) крайне беден титаном, в проходящем свете почти не окрашен. Распределение

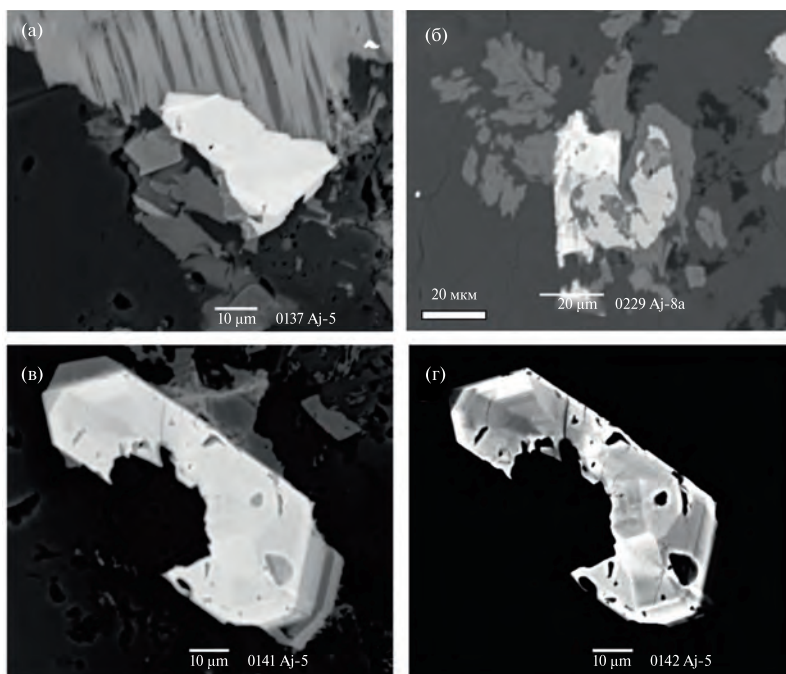


Рис. 4. Биотитсодержащие кварцевые габбронорит-долериты и габбронорит-диориты северо-востока причерноморской полосы интрузива Аю-Даг: (а) – алланит-(Ce) (белый, ан. № 14–17) в сростании с биотитом; (б) – Ti-V алланит-(Ce) (светлый, ан. № 18–19) замещает ильменит (серый); (в, г) – секториально-зональный кристалл алланита-(Ce) (светлый) с тонкой оторочкой алланита-(Y) (темно-серая сверху на левом нижнем снимке). BSE image.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) Ti алланита-(Ce) (№ 1, 3–6), алланита-(Ce) (№ 2) (рис. 1) биотит-кварцевых габбронорит-долеритов юго-запада интрузива Аю-Даг

Компонент	1 (рис. 1б)	2 (рис. 1б)	3 (рис. 1в)	4 (рис. 1в)	5 (рис. 1г)	6 (рис. 1г)
SiO ₂	31.00	31.91	30.11	30.06	30.76	31.19
TiO ₂	3.09	0.19	2.80	2.35	3.37	2.62
V ₂ O ₃	на	на	0.58	0.48	0.47	0.36
Al ₂ O ₃	15.93	16.67	10.91	11.90	13.12	14.48
Fe ₂ O ₃	1.10	3.40	5.13	4.43	1.47	1.02
FeO	12.83	11.42	11.56	12.962	14.14	12.83
MnO	нпо	нпо	0.22	0.28	нпо	нпо
MgO	нпо	нпо	1.06	0.59	0.26	0.25
CaO	11.19	11.10	9.67	9.63	10.44	11.14
Ce ₂ O ₃	12.19	11.61	13.71	13.32	12.68	11.41
La ₂ O ₃	5.25	5.06	8.47	7.90	7.13	6.72
Nd ₂ O ₃	4.52	5.63	2.80	3.67	3.57	3.32
Pr ₂ O ₃	1.23	0.92	0.83	1.07	0.95	0.84
Sm ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	0.35	нпо	нпо
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd ₂ O ₃	на	на	нпо	0.40	нпо	0.37
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	на	на	на	на	0.60	0.63

Таблица 1. Окончание

Компонент	1 (рис. 1б)	2 (рис. 1б)	3 (рис. 1в)	4 (рис. 1в)	5 (рис. 1г)	6 (рис. 1г)
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.86	1.53	0.50	0.60	0.55	0.77
Sc ₂ O ₃	0.24	нпо	0.09	нпо	0.18	0.27
ThO ₂	нпо	нпо	0.71	0.25	нпо	нпо
Сумма	99.43	99.57	99.17	99.92	98.69	97.99
Число атомов в формуле						
Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1					
Ce	0.421	0.400	0.494	0.478	0.452	0.401
La	0.182	0.175	0.308	0.286	0.256	0.237
Nd	0.152	0.189	0.098	0.128	0.124	0.114
Pr	0.042	0.031	0.030	0.038	0.034	0.029
Sm	—	—	—	0.012	—	—
Gd	—	—	—	0.014	—	0.013
REE	0.807	0.795	0.930	0.956	0.866	0.794
Y	0.043	0.077	0.026	0.031	0.029	0.039
Sc	0.020	0.011	0.008	0.008	0.015	0.022
Ca	0.130	0.117	0.021	—	0.090	0.145
Сумма	1					
Fe2+	1.000	0.898	0.826	0.891	0.978	0.980
Fe3+	—	0.102	—	—	—	—
Mg	—	—	0.156	0.086	0.022	0.020
Mn2+	—	—	0.018	0.023	—	—
Сумма	1					
Al	1.692	1.847	1.234	1.319	1.463	1.630
Fe3+	0.078	0.139	0.403	0.327	0.079	0.103
Fe2+	0.181	—	0.169	0.143	0.174	0.050
Ti	0.219	0.014	0.208	0.173	0.247	0.180
V	—	—	0.046	0.038	0.037	0.028
Сумма	2					
Si	2.922	3.000	2.967	2.945	2.957	2.992
Al	0.078	—	0.033	0.055	0.043	0.008
Сумма	3					

Примечания. нпо — ниже предела обнаружения; на — элемент не определялся.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) Ti ферриалланита-(Ce) (№ 7), алланита-(Ce) (№ 8–12) и алланита-(Y) (№ 13) сложно-зонального кристалла (рис. 2б) в биотит-кварцевых габбронорит-долеритах центральной части интрузива Аю-Даг

Компонент	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	28.46	30.90	32.33	31.03	31.23	31.78	32.14
TiO ₂	3.08	0.32	1.57	0.58	0.60	0.23	нпо
Al ₂ O ₃	10.25	16.96	16.91	16.95	17.81	17.34	18.80
Fe ₂ O ₃	9.89	2.91	2.83	3.66	3.05	2.49	1.22
FeO	6.85	10.70	10.71	9.96	9.95	10.91	12.54
MnO	0.31	нпо	0.19	0.24	0.14	нпо	нпо
MgO	0.80	0.25	0.33	0.29	0.25	0.21	нпо
CaO	10.19	10.65	12.18	11.19	11.47	11.00	12.16
Ce ₂ O ₃	13.32	11.63	10.88	10.93	10.18	10.38	4.93
La ₂ O ₃	5.60	5.64	5.46	5.48	5.73	4.29	2.36
Nd ₂ O ₃	4.84	4.66	3.69	4.19	4.16	5.37	4.87
Pr ₂ O ₃	1.10	1.16	0.81	0.93	1.13	1.30	0.47
Sm ₂ O ₃	0.56	0.57	0.39	0.69	0.47	1.10	1.40
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd ₂ O ₃	0.44	0.46	0.30	0.68	0.48	0.75	1.29
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.58	1.12	0.97	1.14	1.21	1.35	6.11
Sc ₂ O ₃	0.19	нпо	0.38	0.16	0.13	0.15	0.14
ThO ₂	0.73	нпо	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо
Сумма	97.19	97.91	99.93	98.17	97.99	98.89	98.43

Число атомов в формуле

Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1						
Ce	0.465	0.409	0.367	0.380	0.351	0.358	0.165
La	0.197	0.200	0.185	0.192	0.200	0.149	0.080
Nd	0.165	0.160	0.121	0.142	0.140	0.181	0.159
Pr	0.038	0.040	0.027	0.032	0.039	0.044	0.015
Sm	0.018	0.019	0.012	0.023	0.015	0.036	0.044
Gd	0.015	0.016	0.009	0.023	0.016	0.025	0.041
REE	0.898	0.844	0.721	0.792	0.761	0.793	0.504
Y	0.029	0.057	0.048	0.058	0.061	0.068	0.297
Sc	0.016	—	0.030	0.013	0.011	0.013	0.011
Th	0.015	—	—	—	—	0.005	—
Ca	0.042	0.096	0.201	0.137	0.167	0.121	0.188

Таблица 2. Окончание

Компонент	7	8	9	10	11	12	13
Сумма	1						
Fe ²⁺	0.857	0.860	0.824	0.791	0.784	0.859	0.958
Fe ³⁺	0.005	0.104	0.116	0.148	0.181	0.111	0.042
Mg	0.113	0.036	0.045	0.041	0.035	0.030	—
Mn ²⁺	0.025	—	0.015	0.020	—	—	—
Сумма	1						
Al	0.867	1.890	1.810	1.845	1.922	1.918	1.958
Fe ³⁺	0.912	0.087	0.081	0.113	0.036	0.065	0.042
Ti	0.221	0.023	0.109	0.042	0.042	0.017	—
Сумма	2						
Si	2.714	2.969	2.976	2.947	2.944	2.993	2.935
Al	0.286	0.031	0.024	0.053	0.056	0.007	0.065
Сумма	3						

Таблица 3. Химический состав (мас. %) Ti алланита-(Ce) (ан. № 14–17) (рис. 3а) и Ti-V алланита-(Ce) (ан. № 18–19) (рис. 3б) биотит-кварцевых габбронорит-долеритов восточной части интрузива Аю-Даг

Компонент	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	30.26	29.99	30.26	30.44	30.15	29.45
TiO ₂	3.16	3.13	3.64	3.19	2.89	2.47
V ₂ O ₃	0.52	0.52	0.45	0.67	3.18	4.41
Al ₂ O ₃	13.38	12.38	13.91	12.57	12.14	9.66
Fe ₂ O ₃	0.14	1.72	1.05	2.20	1.14	3.81
FeO	14.42	14.01	11.51	13.67	13.14	12.26
MnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.16
MgO	0.23	0.23	0.22	0.33	0.56	0.55
CaO	9.51	9.66	10.09	9.46	9.90	9.55
Ce ₂ O ₃	13.62	13.81	13.78	13.92	12.19	13.37
La ₂ O ₃	7.81	7.81	7.42	7.97	10.96	10.37
Nd ₂ O ₃	4.09	3.84	4.19	3.87	1.71	1.90
Pr ₂ O ₃	1.13	1.11	1.03	1.05	0.44	0.64
Sm ₂ O ₃	0.27	0.19	0.21	0.26	нпо	нпо
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd ₂ O ₃	0.31	0.21	0.31	0.21	нпо	нпо
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.21	0.21	0.19	0.21	нпо	нпо
Sc ₂ O ₃	0.16	0.14	0.16	0.10	0.13	0.10

Таблица 3. Окончание

Компонент	14	15	16	17	18	19
ThO ₂	нпо	нпо	нпо	нпо	0.53	0.71
Сумма	99.52	98.96	98.42	100.12	99.09	99.41
Число атомов в формуле						
Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1					
Ce	0.489	0.499	0.484	0.503	0.435	0.487
La	0.282	0.284	0.262	0.284	0.394	0.381
Nd	0.143	0.135	0.144	0.133	0.100	0.068
Pr	0.041	0.040	0.036	0.037	0.016	0.023
Sm	0.009	0.007	0.007	0.008	—	—
Gd	0.011	0.007	0.010	0.007	—	—
REE	0.975	0.972	0.943	0.972	0.945	0.959
Y	0.011	0.011	0.010	0.011	—	—
Sc	0.014	0.012	0.013	0.008	0.011	0.008
Th	—	—	—	—	0.011	0.015
Ca	—	0.005	0.034	0.008	0.033	0.018
Сумма	1					
Fe ²⁺	0.966	0.966	0.968	0.953	0.919	0.905
Mg	0.034	0.034	0.032	0.047	0.081	0.081
Mn ²⁺	—	—	—	—	—	0.014
Сумма	1					
Al	1.513	1.406	1.478	1.362	1.331	1.063
Fe ³⁺	0.013	0.128	0.091	0.162	0.082	0.285
Fe ²⁺	0.200	0.192	0.133	0.184	0.127	0.115
Ti	0.233	0.233	0.263	0.238	0.212	0.185
V	0.041	0.041	0.035	0.052	0.248	0.352
Сумма	2					
Si	2.967	2.964	2.904	2.954	2.937	2.930
Al	0.033	0.036	0.096	0.046	0.063	0.070
Сумма	3					

иттрия и лантанидов в нем специфичное: Y >> Ce = Nd >> La >> Sm = Gd >> Pr.

Интрузив Партенит

Редкоземельные минералы группы эпидота развиты в кварцсодержащих габбронорит-долеритах и габбронорит-диоритах, где они составляют частичные псевдоморфозы по чевкиниту-(Ce) (рис. 5а) и перрьериту-(Ce) (рис. 5б) и обособленные кристаллы (рис. 5в, 5г), обычно в сростаниях

с биотитом и около его выделений. Ферриалланит и богатый титаном алланит-(Ce) в габброидах Партенита не обнаружены, возможно, из-за малого числа изученных кристаллов. Распределение лантанидов и иттрия в алланите-(Ce) Партенита: Ce >> La > Nd > Y > Pr > Sm ~ Gd (ан. № 20–24, табл. 4). Ряд кристаллов алланита-(Ce) окружен оторочкой алланита-(Y) (рис. 4г). В алланите-(Y) кварцевых габброидов Партенита распределение иттрия и лантанидов весьма своеобразное: Y >> >> Ce > Nd ~ Dy > Gd = Er > Yb = La > Sm >> Pr

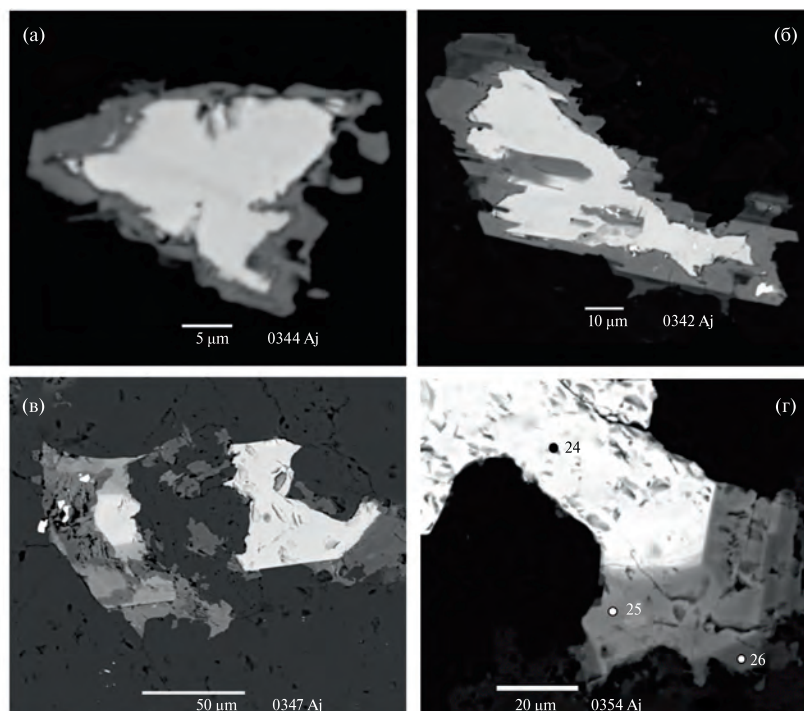


Рис. 5. Биотитсодержащие кварцевые габбронорит-долериты и габбронорит-диориты интрузива Партенит: (а) – кайма замещения алланита-(Ce) (серый, ан. № 20) вокруг чевкинита-(Ce) (светлый); (б) – кайма замещения алланита-(Ce) (серый, ан. № 21) вокруг перрьерита-(Ce) (светлый); (в) – деформированный кристалл алланита-(Ce) (светлый, ан. № 22–23) с каймой REE эпидота (серый); (г) – зональный кристалл: алланит-(Ce) (ан. № 24), алланит (Y) (ан. № 25), REE эпидот (ан. № 26). BSE image.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) алланита-(Ce) (№ 20–24), алланита-(Y) (№ 25), REE эпидота (№ 26) (рис. 4) биотит-кварцевых габбронорит-диоритов интрузива Партенит

Компонент	20 (рис. 4а)	21 (рис. 4б)	22 (рис. 4в)	23 (рис. 4в)	24 (рис. 4г)	25 (рис. 4г)	26 (рис. 4г)
SiO ₂	32.23	31.72	30.98	31.32	30.87	34.39	33.82
TiO ₂	1.14	0.41	1.91	1.70	1.72	нпо	1.51
V ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	0.17	0.23	нпо	нпо
Al ₂ O ₃	15.47	16.05	14.19	15.05	13.98	20.16	18.54
Fe ₂ O ₃	6.64	9.19	5.59	5.61	5.96	8.82	9.56
FeO	8.59	6.80	10.12	9.53	9.38	4.64	4.92
MnO	0.14	0.18	0.18	нпо	нпо	0.43	0.23
MgO	1.29	1.22	1.77	1.60	1.91	0.78	1.28
CaO	12.10	12.62	10.73	10.74	10.22	15.79	16.00
Ce ₂ O ₃	11.80	9.80	11.15	11.87	12.75	1.49	6.87
La ₂ O ₃	6.44	4.64	5.51	5.93	5.48	0.49	3.37
Nd ₂ O ₃	3.25	3.30	4.40	4.57	5.05	1.15	2.37
Pr ₂ O ₃	0.89	0.92	1.15	1.02	1.30	0.42	0.76
Sm ₂ O ₃	0.31	0.55	0.88	0.91	0.86	0.56	0.31
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd ₂ O ₃	0.36	0.57	0.82	0.87	0.65	0.74	нпо

Таблица 4. Окончание

Компонент	20 (рис. 4а)	21 (рис. 4б)	22 (рис. 4в)	23 (рис. 4в)	24 (рис. 4г)	25 (рис. 4г)	26 (рис. 4г)
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	0.60	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	нпо	0.34	0.54	0.63	0.60	1.12	нпо
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	0.31	нпо	нпо	нпо	0.83	нпо
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	0.60	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.57	нпо
Y ₂ O ₃	0.93	1.83	1.60	1.40	0.92	6.95	0.70
ThO ₂	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	101.54	100.28	100.48	102.82	102.38	99.42	100.24
Число атомов в формуле							
Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1						
Ce	0.395	0.329	0.379	0.407	0.438	0.047	0.217
La	0.217	0.157	0.190	0.205	0.189	0.015	0.107
Nd	0.106	0.108	0.146	0.153	0.169	0.035	0.073
Pr	0.030	0.031	0.039	0.035	0.045	0.007	0.024
Sm	0.010	0.018	0.032	0.029	0.028	0.012	0.009
Gd	0.012	0.018	0.027	0.029	0.021	0.022	—
Tb	—	—	—	—	0.019	—	—
Dy	—	0.010	0.040	0.020	0.019	0.032	—
Er	—	0.009	—	—	—	0.022	—
Yb	—	—	—	—	—	0.015	—
REE	0.770	0.680	0.852	0.878	0.928	0.207	0.430
Y	0.045	0.088	0.079	0.070	0.046	0.316	0.032
Ca	0.185	0.232	0.069	0.052	0.026	0.477	0.538
Сумма	1						
Fe ²⁺	0.657	0.521	0.742	0.759	0.733	0.331	0.355
Fe ³⁺	0.156	0.299	—	—	—	0.538	0.522
Mg	0.176	0.166	0.244	0.241	0.267	0.100	0.123
Mn ²⁺	0.011	0.014	0.014	—	—	0.031	—
Сумма	1						
Al	1.619	1.637	1.431	1.482	1.440	1.970	1.803
Fe ³⁺	0.302	0.335	0.436	0.388	0.422	0.030	0.098
Ti	0.079	0.028	0.133	0.118	0.121	—	0.118
V	—	—	—	0.012	0.017	—	—
Сумма	2						
Si	2.950	2.905	2.878	2.937	2.895	2.939	2.918
Al	0.050	0.095	0.122	0.063	0.105	0.061	0.082
Сумма	3						

(ан. № 25, табл. 4). Многие кристаллы алланита окружены зональными каймами REE эпидота (рис. 5в, 5г). В REE эпидоте: $Ce \gg La > Nd \gg Y > Pr \gg Sm$ (ан. № 26, табл. 4). Торий в этих минералах не обнаружен.

Интрузив Лебединского

Ведущий редкоземельный минерал группы эпидота в кварцсодержащих габбронорит-долеритах — это алланит-(Ce) с 2.5–4.9, в среднем с 3.7 мас. % TiO_2 (ан. № 27–32, табл. 5), внешние зоны которого содержат до 1.8 мас. % Th. Он слагает призматиче-

ские кристаллы густо-коричневого и коричневого цвета в сростаниях с биотитом и около его выделений (рис. 6а, 7в). Окраска богатого титаном алланита-(Ce) напоминает окраску обогащенного титаном магматического биотита. Обычно густоокрашенный Ti алланит-(Ce) окружен тонкой оторочкой светло-коричневого алланита-(Ce) с 1.3 мас. % TiO_2 (ан. № 33, табл. 5). Нередко на кристаллы алланита-(Ce) нарос REE эпидот (рис. 6г). Распределение лантанидов и иттрия в богатом Ti алланите-(Ce): $Ce > La \gg Nd \gg Y \sim Pr > Gd > Yb > Tb$; в алланите-(Ce): $Ce > Nd > La \gg Y > Pr > Sm > Gd > Er$; в REE эпидоте: $Ce > Y > Nd = La \gg Gd = Pr \sim Dy > Eu = Er$. Итак,

Таблица 5. Химический состав (масс. %) Ti алланита-(Ce) (№ 27–32), алланита-(Ce) (№ 33) и REE эпидота (№ 34) сложно зонального кристалла (рис. 5г) в биотит-кварцевых габбронорит-долеритах интрузива Лебединского

Компонент	27	28	29	30	31	32	33	34
SiO_2	28.92	30.04	29.61	29.80	31.14	31.17	32.60	35.78
TiO_2	4.85	3.70	3.94	3.73	2.50	3.70	1.26	1.04
V_2O_3	0.27	0.60	0.28	0.25	0.45	0.41	0.65	нпо
Al_2O_3	8.11	11.73	9.86	8.19	13.03	12.44	17.84	18.55
Fe_2O_3	4.70	5.47	4.20	9.34	3.42	2.13	5.37	5.74
FeO	12.07	11.37	12.46	11.03	10.48	11.51	7.14	4.72
MnO	0.39	0.25	0.40	0.62	0.80	1.01	0.27	0.49
MgO	1.17	1.24	1.20	1.26	1.22	1.19	1.20	нпо
CaO	9.03	10.47	9.41	10.11	10.95	10.97	13.63	19.14
Ce_2O_3	12.83	12.47	13.14	11.23	11.06	10.05	8.55	2.85
La_2O_3	8.65	9.54	8.45	8.96	6.64	7.32	2.92	1.22
Nd_2O_3	2.52	2.88	3.61	3.15	3.80	4.37	4.92	1.32
Pr_2O_3	0.74	0.64	0.76	0.69	0.99	0.51	1.10	0.38
Sm_2O_3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.80	нпо
Eu_2O_3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.31
Gd_2O_3	нпо	нпо	нпо	0.35	нпо	0.32	0.52	0.43
Tb_2O_3	нпо	нпо	нпо	0.46	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy_2O_3	0.48	нпо	0.49	нпо	нпо	нпо	нпо	0.38
Ho_2O_3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er_2O_3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.41	0.33
Yb_2O_3	0.36	нпо	0.37	нпо	нпо	нпо	0.57	нпо
Y_2O_3	0.53	0.47	0.53	0.66	0.73	0.81	0.95	1.12
Sc_2O_3	нпо	0.13	нпо	0.09	0.15	0.12	0.13	0.15
ThO_2	0.33	0.37	0.34	0.18	1.84	1.75	0.92	0.62
Сумма	95.95	101.37	98.52	100.10	99.20	99.78	100.52	102.02

Число атомов в формуле

Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1							

Таблица 5. Окончание

Компонент	27	28	29	30	31	32	33	34
Ce	0.485	0.436	0.477	0.404	0.388	0.352	0.280	0.088
La	0.330	0.337	0.309	0.325	0.235	0.258	0.096	0.038
Nd	0.093	0.098	0.128	0.110	0.130	0.149	0.157	0.039
Pr	0.028	0.023	0.027	0.025	0.035	0.018	0.036	0.012
Sm (Eu)	—	—	—	—	—	—	0.025	(0.009)
Gd	—	—	—	0.012	—	0.011	0.016	0.013
Dy (Tb)	0.017	—	0.016	(0.015)	—	—	—	0.011
Er	—	—	—	—	—	—	0.011	0.009
Yb	0.011	—	0.011	—	—	—	—	—
REE	0.964	0.894	0.968	0.891	0.788	0.788	0.621	0.219
Y	0.029	0.024	0.025	0.079	0.037	0.041	0.045	0.050
Sc	—	0.011	—	0.008	0.013	0.010	0.010	0.011
Th	0.007	0.008	0.007	0.004	0.038	0.036	0.018	0.011
Ca	—	0.073	—	0.063	0.124	0.125	0.306	0.709
Сумма	1							
Fe ²⁺	0.786	0.806	0.786	0.764	0.760	0.761	0.534	0.332
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	—	0.288	0.603
Mg	0.180	0.177	0.177	0.185	0.175	0.170	0.158	—
Mn ²⁺	0.034	0.017	0.034	0.051	0.065	0.069	0.020	0.035
Сумма	1							
Al	0.977	1.192	1.126	0.875	1.458	1.388	1.795	1.833
Fe ³⁺	0.258	0.394	0.314	0.690	0.247	0.153	0.073	0.102
Fe ²⁺	0.366	0.102	0.244	0.142	0.080	0.161	—	—
Ti	0.377	0.266	0.294	0.274	0.180	0.266	0.085	0.065
V	0.022	0.046	0.022	0.019	0.035	0.032	0.047	—
Сумма	2							
Si	2.989	2.871	2.950	2.927	2.986	2.984	2.915	3.000
Al	0.011	0.129	0.050	0.073	0.014	0.016	0.085	—
Сумма	3							

алланит-(Ce) и REE эпидот внешних зон кристаллов заметно обогащены неодимом относительно лантана и тяжелыми лантанидами.

Интрузив Кушнарёвский (Первомайский)

Редкоземельные минералы группы эпидота развиты в кварцсодержащих габбронорит-долеритах и габбронорит-диоритах нижней части и в низах средней части интрузива, обычно в сростании с биотитом и около его выделений (рис. 7). Богатый титаном (3.8–4.6 мас. % TiO₂) ферриалланит-(Ce) густо-коричневого цвета в проходящем свете составляет центральную часть кристаллов алланита,

нередко довольно крупных — до 0.6 мм (рис. 7а, б) (ан. № 35–36, табл. 6); внешние зоны обогащены торием — до 1.8 мас. %. Его окружает богатый титаном (2.5–3.8 мас. % TiO₂) алланит-(Ce) коричневого и густо-коричневого цвета в проходящем свете (рис. 7а, б) (ан. № 37–38, табл. 6). Нередко с ферриалланитом-(Ce) и алланитом-(Ce) образуют сростания пластины биотита (рис. 7в). Не столь редко внешнюю зону кристаллов алланита-(Ce) составляет алланит-(Y) (рис. 7в, г). На алланит выросла зональная оторочка REE эпидота, содержащего 0.3–1.1 мас. % TiO₂, коричневатого или почти не окрашенного в проходящем свете (рис. 7а, б)

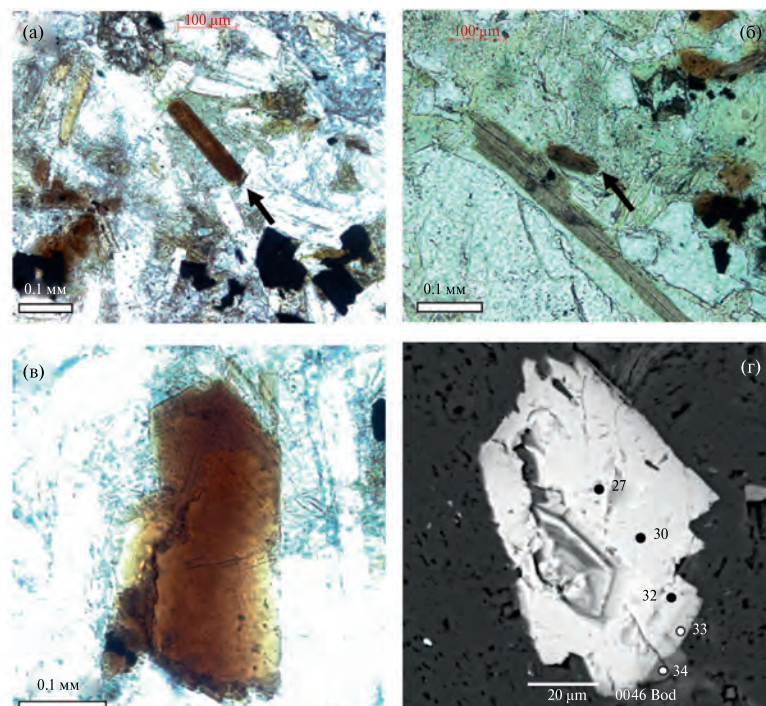


Рис. 6. Тi алланит-(Ce) в биотитсодержащих кварцевых габбронорит-долеритах и габбронорит-диоритах интрузива Лебединского: (а, б, в) – в проходящем свете при 1 никеле; (а) – в центре удлиненный кристалл Тi алланита-(Ce) темно-коричневого цвета; (б) – в центре кристалл алланита-(Ce) коричневого цвета несколько выше пластины биотита; (в) – кристалл Тi алланита-(Ce) коричневого цвета с каймой REE эпидота (сверху справа); освещение усилено; (г) – зональный кристалл: Тi алланит-(Ce) (ан. № 27–32), алланит-(Ce) (ан. № 33), REE эпидот (ан. № 34); BSE image.

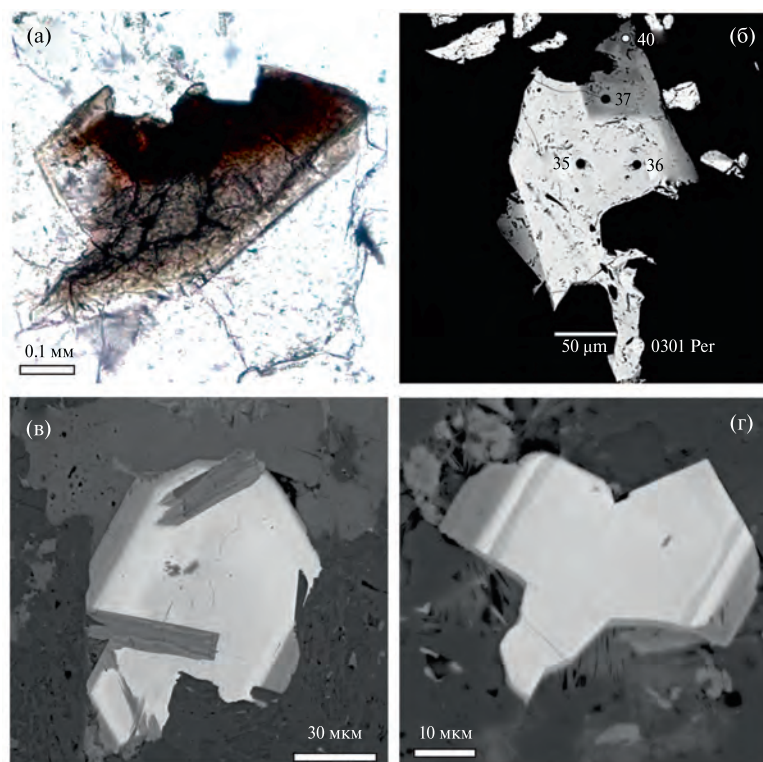


Рис. 7. Зональные кристаллы в биотит-кварцевых габбронорит-диоритах низов средней части Кушнарёвского интрузива: (а) – центр – густо-коричневый Тi алланит-(Ce), более светло-коричневый алланит-(Ce), более светлая оторочка – REE эпидот. В проходящем свете при 1 никеле, освещение усилено; (б) – Тi ферриалланит-(Ce) (ан. № 35–36), Тi алланит (Ce) (ан. № 37), REE эпидот (ан. № 40); (в) – включения пластин биотита (серые) в алланите-(Ce); (в, г) – алланит-(Ce) с внешней серой зоной алланита-(Y). BSE image.

Таблица 6. Химический состав (мас. %) Ti ферриалланита-(Ce) (№ 35–36), Ti алланита-(Ce) (№ 37–38), REE эпидота (№ 39–40) зонального кристалла в биотит-кварцевых габбронорит-диоритах интрузива Кушнарёвский (рис. 6б)

Компонент	35	36	37	38	39	40
	центр	у центра	промеж.	край	оторочка	
SiO ₂	28.83	29.43	31.73	31.33	33.59	36.19
TiO ₂	4.60	3.81	3.77	2.52	0.27	1.06
V ₂ O ₃	0.31	0.32	0.52	0.55	нпо	нпо
Al ₂ O ₃	6.61	8.27	12.46	12.93	19.90	22.64
Fe ₂ O ₃	9.49	11.11	3.33	4.93	9.55	7.87
FeO	11.86	10.15	10.67	9.61	4.70	2.81
MnO	0.38	0.63	1.02	0.76	0.58	0.48
MgO	1.11	1.30	1.14	1.22	нпо	нпо
CaO	9.79	10.45	11.91	11.50	16.76	19.32
Ce ₂ O ₃	12.17	11.44	10.23	11.01	5.40	2.86
La ₂ O ₃	8.62	9.12	7.46	6.62	2.32	1.24
Nd ₂ O ₃	2.39	2.19	2.05	2.82	2.33	1.34
Pr ₂ O ₃	0.70	0.70	0.59	0.94	0.46	0.38
Sm ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	0.37	нпо
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.31
Gd ₂ O ₃	нпо	0.35	0.33	нпо	0.33	0.44
Tb ₂ O ₃	нпо	0.47	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	0.45	нпо	нпо	нпо	0.32	0.38
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.33
Yb ₂ O ₃	0.35	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.50	0.67	0.83	0.75	1.12	1.14
Sc ₂ O ₃	нпо	0.09	0.13	0.17	0.20	0.15
ThO ₂	0.31	0.19	1.80	1.26	нпо	0.63
Сумма	98.47	100.69	99.90	98.73	98.20	98.57

Число атомов в формуле

Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1					
Ce	0.450	0.408	0.353	0.384	0.173	0.087
La	0.321	0.328	0.259	0.233	0.075	0.038
Nd	0.086	0.076	0.069	0.096	0.072	0.040
Pr	0.025	0.025	0.018	0.033	0.015	0.011
Sm (Eu)	—	—	—	—	0.011	(0.009)
Gd	—	0.012	0.011	—	0.010	0.013
Dy (Tb)	0.015	(0.015)	—	—	0.009	0.011
Er (Yb)	(0.011)	—	—	—	—	0.009
REE	0.908	0.864	0.710	0.746	0.365	0.213

Таблица 6. Окончание

Компонент	35	36	37	38	39	40
	центр	у центра	промеж.	край	оторочка	
Y	0.027	0.035	0.042	0.038	0.052	0.050
Sc	—	0.008	0.010	0.014	0.015	0.011
Th	0.007	0.004	0.036	0.026	—	0.011
Ca	0.058	0.089	0.202	0.176	0.568	0.715
Сумма	1					
Fe ²⁺	0.800	0.771	0.758	0.766	0.343	0.195
Fe ³⁺	—	—	—	—	0.614	0.870
Mg	0.167	0.189	0.160	0.173	—	—
Mn ²⁺	0.033	0.052	0.082	0.031	0.043	0.035
Сумма	1					
Al	0.705	0.814	1.375	1.441	1.982	1.934
Fe ³⁺	0.721	0.827	0.236	0.335	—	—
Fe ²⁺	0.200	0.055	0.083	—	—	—
Ti	0.349	0.279	0.267	0.181	0.018	0.066
V	0.025	0.025	0.039	0.043	—	—
Сумма	2					
Si	2.909	2.865	2.991	2.988	2.933	3.000
Al	0.081	0.135	0.009	0.012	0.067	—
Сумма	3					

(ан. № 39–40, табл. 6). Распределение лантанидов и иттрия в редкоземельных минералах кушнарёвских габброидов таково – в Ti ферриалланите-(Ce): Ce > La >> Nd >> Y ~ Pr > Dy = Tb ~ Gd ~ Er; в Ti алланите-(Ce): Ce > La >> Nd > Y > Pr > Gd; в REE эпидоте: Ce >> La = Nd ~ Y >> Pr ~ Gd ~ ~ Dy > Eu. Таким образом, в ходе кристаллизации алланита истощается титан, накапливается неодим относительно лантана, затем – интенсивно накапливается иттрий с образованием алланита-(Y). Редкоземельный состав REE эпидота довольно сильно отличен от более ранних редкоземельных минералов.

АЛЛАНИТ-(Ce) И REE ЭПИДОТ В ПЛАГИОГРАНИТОИДАХ

Интрузив Кушнарёвский (Первомайский)

В кварцевых диоритах верхов средней части интрузива кристаллы алланита-(Ce) с каймой REE эпидота напоминают кристаллы этих минералов в габброидах, но здесь часто размер центральной густоокрашенной зоны меньше, чем окружающей светлоокрашенной зоны. Густоокрашенную зону составляют Ti- или Ti-V алланит-(Ce) с 2.5 мас. %

TiO₂ и 2–2.2 мас. % V₂O₅ (ан. № 41–42, табл. 7). На них вырос малотитанистый алланит-(Ce) (ан. № 43–45, табл. 7); внешние зоны этого алланита по составу приближаются к REE эпидоту. Распределение лантанидов и иттрия в Ti-V алланите-(Ce): Ce > La > Nd >> Pr = Y >> Gd = Dy = Sm > Tb; в малотитанистом алланите-(Ce) существенно иное: Ce > Nd >> Y ~ La > Sm = Gd ~ Pr > Dy > Tb > Eu. В плагиогранитах распространены зональные кристаллы алланита, как сходные с описанными в кварцевых диоритах, так и существенно иные (рис. 8а, б). Одни из них – это блоково-секториально-зональные кристаллы (рис. 8а). На блоки, сложенные Ti алланитом-(Ce) (ан. № 46–47, табл. 8), выросли зоны близкого состава (ан. № 48–49, табл. 8) или с пониженным содержанием титана < 2 мас. % TiO₂ (ан. № 49–51, табл. 8); распределение REE и Y в них: Ce > La >> Nd > Y > Pr > Sm = Gd > Dy. Кристаллы иного типа состоят из пластин различного состава (рис. 8б). Пластина, наиболее богатая лантанидами (ан. № 51), по составу отвечает Ti алланиту-(Ce) с пониженным содержанием титана. На нее выросла пластина малотитанистого алланита-Ce (ан. № 52), в составе которого: Ce > La >> Nd > Y > Pr > Sm > Gd. На алланит

Таблица 7. Химический состав (мас. %) Ti-V алланита-(Ce) (№ 41–42), алланита-(Ce) (№ 43–45) зонального кристалла в кварцевых диоритах интрузива Кушнаревский (Первомайский)

Компонент	41	42	43	44	45
SiO ₂	29.82	30.19	31.78	31.78	34.06
TiO ₂	2.58	2.47	0.69	0.52	0.55
V ₂ O ₃	2.26	2.02	0.24	0.21	нпо
Al ₂ O ₃	11.91	12.50	18.28	18.85	21.98
Fe ₂ O ₃	5.44	5.22	3.85	5.51	2.51
FeO	9.85	9.91	9.71	6.82	8.73
MnO	0.16	0.17	0.45	0.40	0.30
MgO	1.54	1.62	нпо	1.01	нпо
CaO	9.65	9.96	12.01	12.70	14.80
Ce ₂ O ₃	13.07	13.12	7.68	7.37	6.17
La ₂ O ₃	7.31	7.49	2.15	1.83	1.72
Nd ₂ O ₃	3.96	4.01	6.19	6.14	4.88
Pr ₂ O ₃	1.12	1.12	1.27	1.27	0.99
Sm ₂ O ₃	0.40	0.49	1.67	1.66	1.36
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	0.42	нпо
Gd ₂ O ₃	0.45	0.46	1.51	1.49	1.29
Tb ₂ O ₃	0.45	нпо	0.54	нпо	0.51
Dy ₂ O ₃	0.50	0.42	1.03	0.66	1.01
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.77	0.73	1.64	1.70	1.61
Sc ₂ O ₃	нпо	0.12	0.10	0.09	0.15
ThO ₂	на	на	на	на	на
Сумма	101.24	102.02	100.79	99.95	102.59

Число атомов в формуле

Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1				
Ce	0.464	0.456	0.257	0.244	0.194
La	0.261	0.263	0.073	0.061	0.055
Nd	0.137	0.136	0.202	0.199	0.150
Pr	0.040	0.039	0.042	0.042	0.031
Sm	0.013	0.016	0.053	0.052	0.040
Eu	—	—	—	0.013	—
Gd	0.015	0.015	0.048	0.047	0.039
Tb	0.014	—	0.017	—	0.014
Dy	0.016	0.014	0.032	0.021	0.029
REE	0.960	0.939	0.734	0.679	0.552
Y	0.040	0.037	0.080	0.082	0.074

Таблица 7. Окончание

Компонент	41	42	43	44	45
Sc	—	0.010	0.008	0.007	0.011
Ca	—	0.014	0.178	0.232	0.363
Сумма	1				
Fe ²⁺	0.764	0.757	0.743	0.516	0.625
Fe ³⁺	—	—	0.222	0.318	0.353
Mg	0.223	0.229	—	0.136	—
Mn ²⁺	0.013	0.014	0.035	0.030	0.022
Сумма	1				
Al	1.248	1.267	1.891	1.892	1.901
Fe ³⁺	0.395	0.373	0.044	0.058	0.063
Fe ²⁺	0.034	0.030	—	—	—
Ti	0.146	0.176	0.047	0.035	0.036
V	0.175	0.154	0.018	0.015	—
Сумма	2				
Si	2.888	2.868	2.909	2.879	2.928
Al	0.112	0.132	0.081	0.121	0.072
Сумма	3				

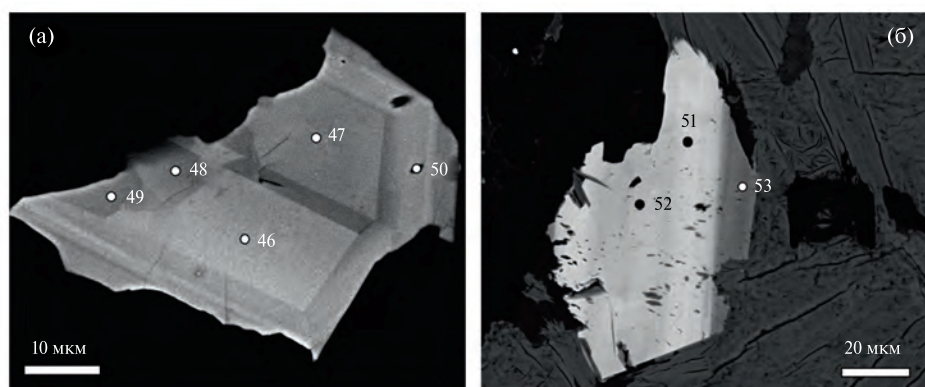


Рис. 8. Блоково-секториально-зональные кристаллы алланита-(Ce) в биотитовых плагиогранитах Кушнарёвского интрузива: (а) – Ti алланит-(Ce) (№ 46–50); (б) – Ti алланит-(Ce) (№ 51), алланит-(Ce) (№ 52), REE эпидот (№ 53). BSE image.

наросли пластины REE эпидота (рис. 8б; ан. № 53, табл. 8), в его составе: $Ce > La > Y > Nd$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пример габброидов и плагиогранитоидов Горного Крыма показал, насколько непростыми являются формирование и эволюция акцессорного алланита (ортита). Фактические данные о типах редкоземельных минералов группы эпидота, их соотношениях с иными минералами магматических пород первомайско-аюдагского интрузивного

комплекса свидетельствуют о заметном отличии их в габброидах и в плагиогранитоидах. Богатый титаном ферриалланит-(Ce), экстремально богатый ванадием Ti алланит-(Ce) и алланит-(Y) развиты только в габброидах комплекса; только в этих породах минералы группы эпидота содержат заметное количество тория. Редкоземельные минералы группы эпидота в габброидах тесно связаны с минералами шестой минеральной ассоциации, тогда как Ti-V алланит-(Ce), алланит-(Ce) и REE эпидот в плагиогранитоидах тесно связаны с кварц-олигоклазовой и кварц-альбит-олигоклазовой гра-

Таблица 8. Химический состав (мас. %) Ti алланита-(Ce) (№ 46–51), алланита-(Ce) (№ 52) секториально-блоково-зональных кристаллов с каймой REE эпидота (№ 53) (рис. 7) в биотитовых плагиогранитах Кушнаревского интрузива

Компонент	46 (рис. 7а)	47 (рис. 7а)	48 (рис. 7а)	49 (рис. 7а)	50 (рис. 7а)	51 (рис. 7б)	52 (рис. 7б)	53 (рис. 7б)
SiO ₂	30.23	30.22	31.49	31.87	31.43	30.45	31.06	35.18
TiO ₂	2.87	2.58	2.86	2.81	1.93	1.67	0.79	0.26
V ₂ O ₃	0.37	0.23	0.27	0.22	0.51	0.28	0.25	нпо
Al ₂ O ₃	12.20	13.43	13.32	14.38	13.70	12.75	16.79	21.74
Fe ₂ O ₃	4.29	7.01	4.85	3.57	5.91	5.18	8.46	13.89
FeO	12.64	9.17	10.92	11.64	10.53	11.51	6.18	—
MnO	0.25	0.32	0.33	0.24	0.32	0.25	0.52	0.77
MgO	1.26	1.18	1.39	1.28	1.25	1.20	1.24	0.72
CaO	10.63	11.61	11.93	12.10	11.36	11.31	12.40	20.09
Ce ₂ O ₃	12.45	11.90	11.829	11.76	11.82	12.44	10.63	3.10
La ₂ O ₃	7.39	7.11	5.36	5.83	6.27	7.26	6.89	2.01
Nd ₂ O ₃	2.85	2.65	3.50	2.91	3.99	3.28	2.56	1.05
Pr ₂ O ₃	0.85	0.80	1.03	0.81	1.15	0.94	0.87	нпо
Sm ₂ O ₃	0.37	0.38	0.69	0.50	0.60	нпо	0.56	нпо
Eu ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd ₂ O ₃	0.58	0.41	0.58	0.49	0.61	нпо	0.45	нпо
Tb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Dy ₂ O ₃	0.46	0.48	нпо	0.50	нпо	нпо	нпо	нпо
Ho ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Er ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Y ₂ O ₃	0.98	0.87	1.15	1.06	1.21	нпо	0.99	1.15
ThO ₂	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	100.67	100.25	100.96	101.92	102.43	98.54	100.64	99.96

Число атомов в формуле

Ca	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Сумма	1							
Ce	0.434	0.414	0.383	0.394	0.400	0.437	0.337	0.093
La	0.260	0.250	0.183	0.197	0.214	0.257	0.233	0.061
Nd	0.097	0.090	0.116	0.095	0.132	0.112	0.084	0.031
Pr	0.029	0.028	0.035	0.027	0.039	0.033	0.029	—
Sm	0.012	0.012	0.022	0.016	0.019	—	0.018	—
Gd	0.010	0.014	0.019	0.016	0.020	—	0.014	—
Dy	0.015	0.015	—	0.014	—	—	—	—
REE	0.866	0.823	0.758	0.759	0.824	0.839	0.735	0.185
Y	0.049	0.044	0.057	0.052	0.052	—	0.048	0.050
Ca	0.085	0.133	0.185	0.189	0.126	0.161	0.217	0.765
Сумма	1							

Таблица 8. Окончание

Компонент	46 (рис. 7a)	47 (рис. 7a)	48 (рис. 7a)	49 (рис. 7a)	50 (рис. 7a)	51 (рис. 7б)	52 (рис. 7б)	53 (рис. 7б)
Fe ²⁺	0.799	0.729	0.782	0.806	0.721	0.804	0.474	—
Fe ³⁺	—	0.078	—	—	0.082	—	0.316	0.858
Mg	0.180	0.167	0.192	0.175	0.172	0.175	0.170	0.088
Mn ²⁺	0.021	0.026	0.026	0.019	0.025	0.021	0.040	0.054
Сумма	1							
Al	1.250	1.375	1.377	1.461	1.403	1.364	1.660	1.984
Fe ³⁺	0.516	0.423	0.339	0.226	0.424	0.375	0.268	—
Fe ²⁺	—	—	0.065	0.084	—	0.119	—	—
Ti	0.206	0.184	0.199	0.193	0.135	0.120	0.054	0.016
V	0.028	0.018	0.020	0.016	0.038	0.022	0.018	—
Сумма	2							
Si	2.880	2.871	2.921	2.912	2.909	2.922	2.847	2.883
Al	0.120	0.129	0.079	0.088	0.091	0.078	0.153	0.117
Сумма	3							

фикой седьмой минеральной ассоциации. Таким образом, алланит-(Ce) в 6-й МА в габброидах представляет его I генерацию, алланит-(Ce) в 7-й МА в плагиогранитоидах представляет его II генерацию.

Редкоземельные минералы группы эпидота первой генерации в кварцевых габброидах Горного Крыма

Наиболее ранний из них — Ti-ферриалланит-(Ce), слагающий ядра кристаллов Ti алланита-(Ce) в Кушнарёвском интрузиве (рис. 7б, ан. № 35–36, табл. 6) и ядра кристаллов алланита-(Ce) в интрузиве Аю-Даг (рис. 3б, ан. № 7, табл. 2); это алланит первого зарождения. Ti алланит-Ce и Ti-V алланит-Ce, слагающие обособленные кристаллы (рис. 4а, ан. № 14–17; рис. 4б, ан. № 18–19, табл. 3) и ядра кристаллов алланита-(Ce) в интрузиве Аю-Даг (рис. 2б, ан. № 1, табл. 1; рис. 3б; ан. № 7, табл. 2), в Лебединском (рис. 6г, ан. № 27–32, табл. 5) и в Кушнарёвском (рис. 7б; ан. № 37–38, табл. 5); это алланит второго зарождения. На Ti ферриалланит-(Ce) и Ti алланит-(Ce) почти повсеместно вырос малотитанистый и бедный ванадием алланит-(Ce), который представляет алланит третьего зарождения (рис. 2б; ан. № 2, табл. 1; рис. 3б; ан. № 8–12, табл. 2 и др.); нередко алланит-(Ce) слагает обособленные кристаллы (рис. 5в, ан. № 22–23, табл. 4). На кристаллы алланита-(Ce) довольно часто вырос алланит-(Y) — в Аю-Даге (рис. 3, табл. 2), в Партените (рис. 5, табл. 4), в Кушнарёвском (рис. 7в, г); это алланит четвертого зарождения. Алланит 2-го, 3-го и 4-го зарождений окружает

REE эпидот (рис. 5г, ан. № 26, табл. 4; рис. 6г, ан. № 34, табл. 5; рис. 7б, ан. № 39–40, табл. 6). Такова установленная последовательность формирования редкоземельных минералов группы эпидота в островодужных габброидах Горного Крыма.

Богатые титаном ферриалланит-(Ce) и алланит-(Ce) 1-го и 2-го зарождений в значительной мере унаследовали свой состав от замещенных чевкинита-(Ce) и перрьерита-(Ce), отчасти от ильменита. Источник повышенных концентраций ванадия в алланите не ясен. Вероятная причина возникновения раннего ферриалланита вместо алланита — остаточная повышенная водонасыщенность расплава, о чем может свидетельствовать наличие магматических амфиболов — паргасита и эденита — в составе предшествующей 5-й минеральной ассоциации (Спиридонов и др., 2023). Вероятный источник тория, которым крайне бедна исходная базитовая магма комплекса, растворяющийся ксеногенный торит, которого немало в габброидах; по-видимому, с этим связано хаотичное появление в составе алланита повышенных содержаний тория (до 1.8 мас. %). Возникновение алланита-(Y) — наиболее позднего среди алланита в габброидах — очевидно, связано с накоплением иттрия в расплаве; источниками Y могли быть замещающие чевкинит, перрьерит и растворяющийся реликтовый циркон, содержащий до 6 мас. % Y (Спиридонов и др., 2018, 2019б). Накопление Y сопровождало появление в алланите тяжелых лантанидов: Tb, Dy, Er, Yb.

Среднее содержание лантанидов, иттрия и тория в ферроалланите-(Ce) и алланите-(Ce) габброидов,

$n = 34$, арфу (в скобках диапазон значений): Ce 0.419 (0.329–0.501); La 0.248 (0.096–0.304); Nd 0.127 (0.068–0.189); Pr 0.032 (0.016–0.045); Sm 0.009 (следы – 0.036); Gd 0.010 (следы – 0.029); Dy ~ 0.0015 (следы – 0.040); Tb ~ 0.0005 (следы – 0.019); Er ~ 0.0005 (следы – 0.011); Yb ~ 0.0005 (следы – 0.011); Y 0.040 (следы – 0.088); Th 0.008 (следы – 0.038). Среднее содержание лантанидов (в % от суммы REE) и иттрия (в % от суммы REE и Y) в ферроалланите-(Ce) и алланите-(Ce) габброидов, $n=34$ (в скобках диапазон значений): Ce 49.5% (44–53); La 29.3% (15–42); Nd 15.0% (7–25); Pr 3.8% (2–6); Sm 1.1% (следы – 4); Gd 1.2% (следы – 4); Dy ~ 0.2% (следы – 3); Tb ~ 0.1% (следы – 3); Er ~ 0.1% (следы – 5); Yb ~ 0.1% (следы – 1); Y 4.5% (следы – 11). Наиболее устойчиво содержание главного лантанида – церия. Весьма изменчиво – в три раза – содержание неодима, лантана, празеодима. Крайне изменчиво содержание иттрия и иттриевых редкоземельных элементов, а также тория. Эволюция состава редкоземельных минералов группы эпидота представлена на рис. 9:

виден отчетливый тренд истощения La и накопления Nd от ранних зарождений к поздним.

Редкоземельные минералы группы эпидота II генерации в плагиогранитоидах Горного Крыма. В кварцевых диоритах более раннее образование – Ti-V алланит-(Ce), слагающий центральную часть кристаллов густого коричневого цвета в проходящем свете (ан. № 40–41, табл. 7), это 1-е зарождение алланита в плагиогранитоидах Горного Крыма. Минерал содержит 2.5–2.6 мас. % TiO_2 и 2.3–2.6 мас. % V_2O_3 . Распределение лантанидов и иттрия в нем: $Ce > La > Nd >> Pr = Y >> Gd = Dy = Sm > Tb$. На Ti-V алланит-(Ce) вырос малотитанистый и бедный ванадием алланит-(Ce) 2-го зарождения светло-коричневого цвета в проходящем свете (ан. № 43–45, табл. 7); распределение лантанидов и иттрия в нем существенно иное: $Ce > Nd >> Y \sim La > Sm = Gd \sim Pr > Dy > Tb > Eu$. В кристаллах алланита в плагиогранитоидах центральные их зоны или блоки слагает Ti алланит-(Ce) 1-го зарождения с 2.6–2.9 мас. % TiO_2 и 0.2–0.4 мас. % V_2O_3 (рис. 8а; ан. № 46–49, табл. 8) густо-коричневого цвета, по краям более

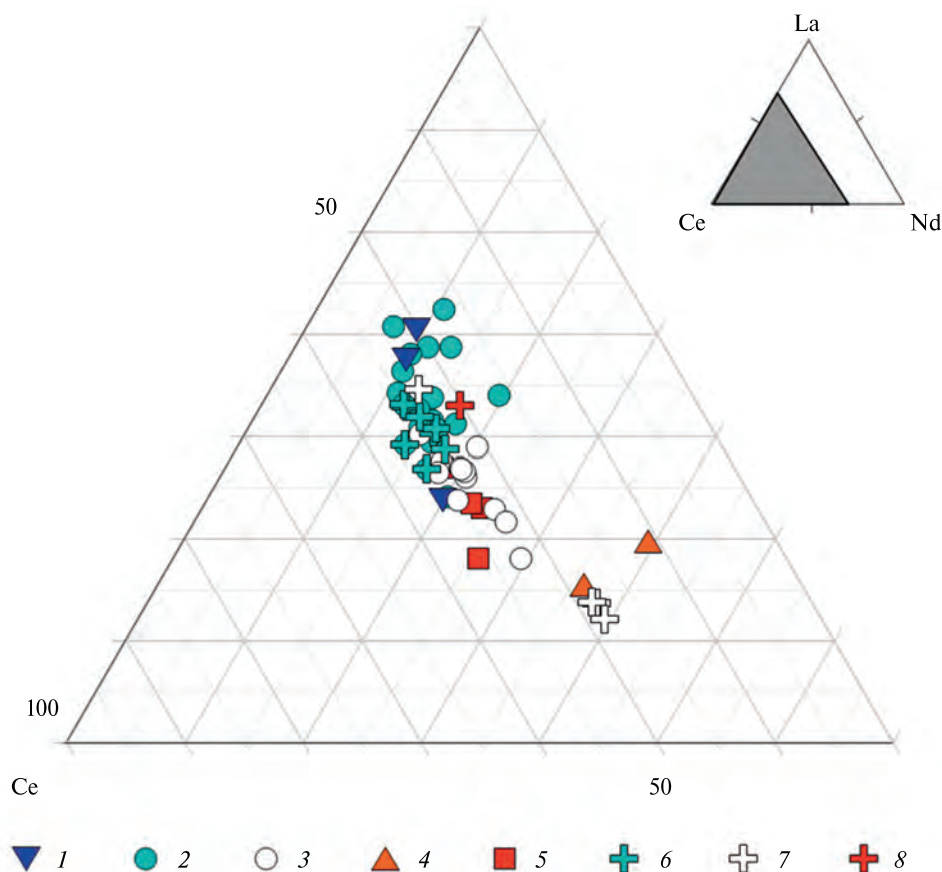


Рис. 9. Относительное содержание Ce, La, Nd в алланите и REE эпидоте Горного Крыма. Кварцевые габброиды: 1 – Ti ферриалланит-(Ce) 1-го зарождения; 2 – Ti и Ti-V алланит-(Ce) 2-го зарождения; 3 – Алланит-(Ce) 3-го зарождения; 4 – Алланит-(Y) 4-го зарождения; 5 – REE эпидот. Плагиогранитоиды: 6 – Ti и Ti-V алланит-(Ce) 1-го зарождения; 7 – Алланит-(Ce) 2-го зарождения; 8 – REE эпидот.

бедный титаном — с 1.9 мас. % TiO_2 и 0.5 мас. % V_2O_3 (ан. № 50, табл. 8), светло-коричневого цвета в проходящем свете. Распределение лантанидов и иттрия в этом минерале: $\text{Ce} > \text{La} \gg \text{Nd} \gg \text{Y} > \text{Pr} > \text{Sm} = \text{Gd} \sim \text{Dy}$. В кристаллах алланита с пластинчатой структурой центральные пластины слагает Ti алланит-(Ce) 1-го зарождения, относительно бедный титаном — с 1.7 мас. % TiO_2 и 0.3 мас. % V_2O_3 (рис. 8б, ан. № 51, табл. 8), светло-коричневого цвета в шлифе; распределение лантанидов и иттрия в нем: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} \gg \text{Pr}$. На эти пластины вырос малотитанистый алланит-(Ce) 2-го зарождения (рис. 8б, ан. 52, табл. 8), бледно-коричневаты в проходящем свете; распределение лантанидов и иттрия в нем: $\text{Ce} > \text{La} \gg \text{Nd} \gg \text{Y} > \text{Pr} > \text{Sm} > \text{Gd}$. Внешние пластины таких кристаллов слагает REE эпидот (рис. 8б, ан. 53, табл. 8), почти не окрашенный в проходящем свете; распределение лантанидов и иттрия в нем: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Y} > \text{Nd}$.

Среднее содержание лантанидов и иттрия в алланите-(Ce) плагиигранитоидов, $n = 12$, арфу (в скобках диапазон значений): Ce 0.364 (0.194–0.464); La 0.193 (0.055–0.263); Nd 0.129 (0.084–0.202); Pr 0.035 (0.027–0.042); Sm 0.023 (следы – 0.053); Eu ~0.001 (следы – 0.013); Gd 0.021 (следы – 0.048); Dy ~0.013 (следы – 0.032); Tb 0.004 (следы – 0.017); Y 0.051 (следы – 0.082). Среднее содержание лантанидов (в % от суммы REE) и иттрия (в % от суммы REE и Y) в алланите-(Ce) плагиигранитоидов, $n = 12$ (в скобках диапазон значений): Ce 46.5 % (35–52); La 24.6% (9–32); Nd 16.5% (11–29); Pr 4.4 % (3–6); Sm 2.9% (следы – 8); Eu ~0.1% (следы – 2); Gd 2.7% (следы – 7); Dy 1.7% (следы – 5); Tb ~0.5 % (следы – 3); Y 6.2 % (следы – 12). Содержание церия и неодима меняется в два раза, лантана — в пять раз. Крайне изменчивы содержания иттрия и иттриевых редкоземельных элементов. Эволюция состава редкоземельных минералов группы эпидота представлена на рис. 8: отчетлив тренд истощения La и накопления Nd.

Эволюция состава редкоземельных минералов группы эпидота в островодужных габброидах и плагиигранитоидах Горного Крыма

Установлено, что один из ярких индикаторов эволюции состава указанных минералов — соотношение содержаний лантана и неодима: лантан обогащает более ранние зарождения, неодим — более поздние. Другой индикатор — содержание титана, который, как известно, обогащает более высокотемпературные разновидности силикатов — кварца, биотита, амфиболов, циркона и иных; выше показано, что эта тенденция проявлена и в крымском алланите — ранние зарождения данных минералов обогащены титаном (и ванадием). Один из индикаторов — суммарное

содержание лантанидов, которое стандартно снижается от ранних зарождений алланита к поздним и далее — к REE эпидоту. С учетом этого построены диаграммы эволюции состава рассматриваемых минералов (рис. 10).

На всех диаграммах рис. 10 точки содержаний компонентов в изученных минералах образуют связанные комплексы. Очевидно, что это — генетически единая серия минералов в каждом конкретном интрузиве и во всей совокупности островодужных кварцевых габброидов и плагиигранитоидов Горного Крыма. Впечатляет почти линейная зависимость суммарных количеств титана с ванадием и отношения содержания лантана к неодиму (правая верхняя диаграмма); максимальные значения того и другого параметра типичны для самых ранних зарождений алланита, минимальные значения — для наиболее позднего REE эпидота. Зависимости иных параметров не линейные, имеют экспоненциальный характер. Таков характер положительной зависимости суммы титана с ванадием и суммы лантанидов, при этом величина $\text{Ti} + \text{V}$ резко снижается уже при незначительном понижении суммы REE (левая верхняя диаграмма). Таков же характер положительной зависимости содержания церия и величины La/Nd , при этом высокие содержания церия устойчивы в весьма широком диапазоне значения La/Nd , и только затем тот и другой параметры резко снижаются (правая нижняя диаграмма). Таков характер отрицательной зависимости величин Ce/La и La/Nd — почти идеальная экспонента (левая нижняя диаграмма); из этой диаграммы следует, что алланит-(Ce) в плагиигранитоидах обеднен лантаном и обогащен неодимом, т.е. более низкотемпературное образование, чем алланит-(Ce) в габброидах.

Распределение REE и Y в алланите-(Ce) всей совокупности кристаллов (46 анализов) островодужных магматических пород Горного Крыма имеет хондритовый характер.

Сравнение алланита-(Ce) островодужных кварцевых габброидов и плагиигранитоидов Горного Крыма с мировыми типами

Известно, что редкоземельный состав алланита-(Ce) довольно устойчив. Об этом свидетельствуют и данные в табл. 9. Видно, что все пересыщенные кремнеземом интрузивные породы от гранитов до кварцевых габброидов содержат алланит близкого состава, который отличен от алланита щелочных магматитов существенно более низкими содержаниями лантана и существенно более высокими содержаниями иттрия и тяжелых лантанидов. Разница между составом алланита гранитов и гранитных пегматитов прежде всего в более высоком лантан-неодимовом отношении в более

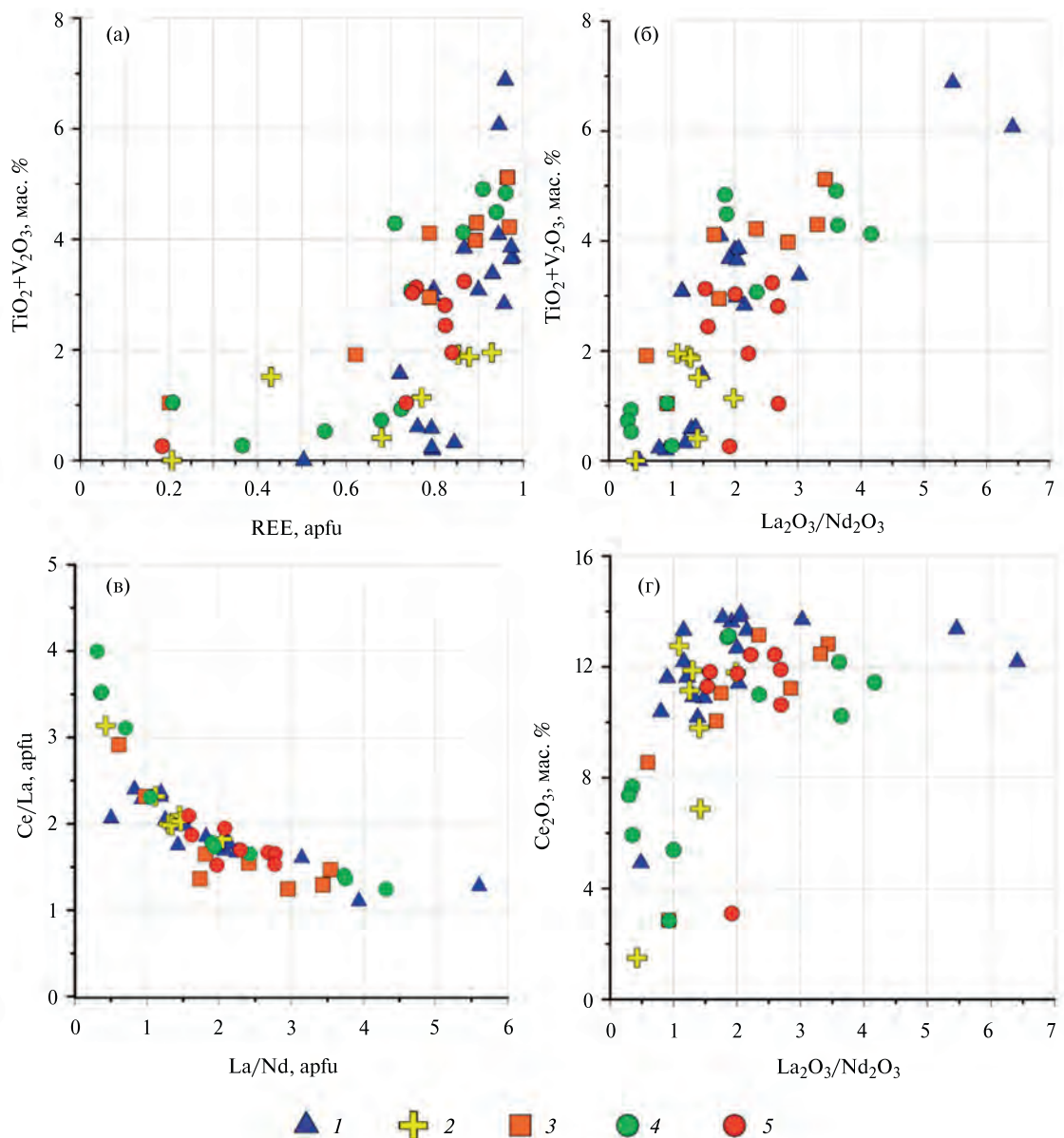


Рис. 10. Вариации состава редкоземельных минералов группы эпидота габброидов и плагиогранитоидов Горного Крыма: 1 – в габброидах Аю-Дага, 2 – в габброидах Партенита, 3 – в габброидах Лебединского интрузива, 4 – в габброидах Кушнаревского интрузива, 5 – в плагиогранитоидах Кушнарёвского интрузива.

высокотемпературных гранитах – $100\text{La/Nd} = 164$ против 140. Редкоземельный состав алланита-(Ce) плагиогранитоидов Крыма близок таковому мирового типа алланита в гранитах по (Fleischer, 1985); единственное существенное отличие – в два раза повышенное содержание Gd в алланите-(Ce) крымских плагиогранитоидов. Различие редкоземельного состава алланита кварцевых габброидов и плагиогранитоидов Крыма напоминает различие между мировыми типами гранитов и гранитных пегматитов: в алланите кварцевых габброидов существенно выше лантан-неодимовое отношение – 195 против 149. Кроме того, алланит-(Ce) в плагиогра-

нитоидах богаче иттрием и тяжелыми лантанидами, которые обычно накапливаются в более поздних зарождениях алланита-(Ce) (табл. 9).

О вероятной причине окраски алланита-(Ce) крымских пород

Фактические данные, приведенные выше, свидетельствуют, что основным хромофором крымского алланита-(Ce), вероятно, является Ti^{4+} (комбинация $\text{Ti}^{4+} - \text{Fe}^{2+}$) или $\text{Ti}^{4+} + \text{V}^{3+}$ (в комбинации с Fe^{2+}). Не исключено определенное влияние на окраску примеси тория (до 3 мас. %).

Таблица 9. Среднее содержание лантанидов (в % от их суммы) и иттрия (в % от суммы лантанидов и иттрия) в алланите-(Ce) различных типов магматических пород

Источник	Данные авторов, Горный Крым	Fleischer, 1985				
Типы горных пород	Кварцевые габбро-нориты и габбро-норит-диориты	Кварцевые диориты и плагиограниты	Граниты	Гранитные пегматиты	Щелочные породы	Щелочные пегматиты
La/REE, %	29.3	24.6	25.3	22.2	33.3	34.9
Ce/REE, %	49.4	46.5	48.1	43.2	49.6	50.8
Pr/REE, %	3.8	4.4	5.0	5.7	4.3	3.8
Nd/REE, %	15.0	16.5	15.4	15.9	11.1	9.1
Sm/REE, %	1.1	2.9	2.4	4.1	0.7	0.6
Gd/REE, %	1.2	2.7	1.3	3.8	0.2	0.3
Y/REE+Y, %	4.4	6.0	6.8	9.6	0.3	1.1
n	34	12	139	114	13	24
100 La/Nd	195	149	164	140	300	384

ВЫВОДЫ

1. В островодужных биотитсодержащих кварцевых габброидах Горного Крыма установлено пять зарождений редкоземельных минералов группы эпидота: 1) Ti ферриалланит-(Ce); 2) Ti и Ti-V алланит-(Ce); 3) алланит-(Ce) (наиболее распространен); 4) алланит-(Y); 5) REE эпидот. Вероятная причина возникновения раннего ферриалланита – остаточная водонасыщенность расплава. Ферриалланит-(Ce) и алланит-(Ce) 1-го и 2-го зарождений наследовали редкоземельный состав и повышенные содержания титана замещенных чевкинита-(Ce) и перьерита-(Ce). Дополнительным источником Y при образовании алланита-(Y) мог быть растворяющийся богатый Y реститовый циркон, которого немало в габброидах. Хаотичное появление в алланите повышенных содержаний Th (до 1.8 мас. %), по-видимому, связано с растворением ксеногенного торита.

2. В островодужных плагиогранитоидах Горного Крыма установлено три зарождения редкоземельных минералов группы эпидота: 1) Ti и Ti-V алланит-(Ce); 2) алланит-(Ce); 3) REE эпидот.

3. В целом алланит-(Ce) крымских габброидов отличен от алланита-(Ce) крымских плагиогранитоидов более высоким лантан-неодимовым отношением 100La/Nd – 195 против 149; кроме того, алланит-(Ce) в плагиогранитоидах богаче иттрием и тяжелыми лантанидами, которые обычно накапливаются в более поздних зарождениях алланита-(Ce). Ферриалланит-(Ce) и алланит-(Ce) ранних зарождений обогащены REE > 0.8 apfu, Ce (>10 мас. %) и особенно – La, обеднены Nd, для

них характерна повышенная величина $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Nd}_2\text{O}_3$ от 6.5 до 2, пониженная величина $\text{Ce}/\text{La apfu} < 2$.

4. Редкоземельный состав алланита-(Ce) крымских плагиогранитоидов близок к мировому типу алланита в гранитах; единственное существенное отличие – в два раза повышенное содержание Gd в крымском алланите-(Ce).

Авторы благодарны П. М. Карташову, д.г.-м.н. В. И. Алексееву, анонимному рецензенту и научному редактору за конструктивную критику.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития Московского университета имени М. В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Армбрустер Т., Бонацци П., Акасака М., Берманец В., Шопен К., Жире Р., Хеус-Ассбихлер С., Лейбшер А., Менчетти С., Пан Я., Мазеро М. (2006) Рекомендуемая номенклатура минералов группы эпидота. *Записки РМО*. 135 (6), 19–23.
- Барсанов Г.П. (1949) Минералы Ильменского заповедника. Изд. Урал. филиала АН СССР. 475 с.
- Багдасарян Г.П., Лебединский В.И. (1967) Новые данные об абсолютном возрасте магматических пород Горного Крыма. *ДАН СССР*. 173 (1), 149–152.
- 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., Шафрановский И.И. (1936) Курс минералогии. М.-Л.: ОНТИ. 1136 с.
- Вернадский В.И. (1914) Опыт описательной минералогии. Петроград. 780 с.

- Губин В.А., Хиллер В.В. (2014) Акцессорные алланиты Адуйского гранитного массива (Средний Урал). *Вестник Уральского отделения РМО*. (11), 12–16.
- Еременко Г.К., Еременко Е.И. (1972) Метакарбонатные контактовые роговики Аю-Дага *ДАН УССР*. Серия Б. (7). С. 585–589.
- Кокшаров Н.И. (1848) Кристаллическая система уралорти-та. *Горный журнал*. Часть 2. Книга 5. С. 204–227.
- Кравченко С.М. (1958а) Геология интрузивного комплекса юга центральной части Горного Крыма: диссертация канд. геол.-мин. наук. Москва: МГРИ. 260 с.
- Кравченко С.М. (1958б) Петрографические особенности интрузивных массивов юга Центрального Крыма в свете новых данных. *Известия АН СССР*. Геология. (3), 100–105.
- Лабунцов А.Н. (1939) Пегматиты Северной Карелии. *Пегматиты СССР*. Т. 2. М.-Л.: АН СССР. 260 с.
- Лагорио А.Е. (1887) К геологии Крыма. О некоторых массивных горных породах Крыма и их геологическом значении. *Записки Варшавского университета*. (5), 1–16; (6), 17–48.
- Латышев А.В., Панов Д.И. (2008) Юрские магматические тела в долине реки Бодрак, ЮЗ Крым. *Вестник МГУ*. Серия геология. 4 (2), 70–78.
- Лебединский В.И. (1962) Пластовые интрузии в таврической серии и их роль в геологической истории Горного Крыма. *Известия АН СССР*. Серия геология. (4), 32–39.
- Лебединский В.И., Соловьев И.В. (1988) Байосские вулканоструктуры Горного Крыма *Геологический журнал*. (4), 85–93.
- Лучицкий В.И. (1939) Петрография Крыма. Петрография СССР. Серия 1. Региональная петрография. Вып. 8. М.-Л.: изд. АН СССР. 98 с.
- Милеев В.С., Барабошкин Е.Ю., Розанов С.Б., Рогов М.А. (2009) Тектоника и геодинамическая эволюция Горного Крыма. *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. 84 (3), 3–21.
- Морозова Е.Б., Сергеев С.А., Суфиев А.А. (2012) U-Pb цирконовый (Shrimp) возраст Джидайской интрузии как реперного объекта для геологии Крыма. *Вестник СПбГУ. Серия геология и география*. (4), 25–33.
- Никитин М.Ю., Болотов С.Н. (2007) Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. М.: МГУ. Часть 2. 110 с.
- Овсянников Г.Н., Спиридонов Э.М., Филимонов С.В. (2024) Плагноклаз интрузивных пород островодужного первомайско-аюдагского комплекса Горного Крыма: от плагиоцерцолитов до плагиогранитов. *Вестник МГУ. Геология*. (2), 85–95.
- Павлинов В.Н. (1946) Форма и механизмы образования малых интрузий типа лакколитов. М.: изд. МГРИ. 411 с.
- Попова В.И., Баженова Л.Ф., Поляков В.О. (1980) Ортит из Ильменских гор. *Минералогический журнал*. 2 (3), 73–82.
- Путинцева Е.В., Спиридонов Э.М. (2016) Алланит-(Се) – характерный минерал метакимберлитов Кимозера, Карелия. *Записки РМО*. 145 (4), 79–91.
- Руманова И.М., Николаева Т.В. (1959) Кристаллическая структура ортита. *Кристаллография*. 4 (8), 789–795.
- Спиридонов Э.М. (2018) Метаморфические образования киммерид Горного Крыма. *Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии*. М.: Геос. 2, 223–227.
- Спиридонов Э.М., Кравченко С.М., Степанов В.К., Путинцева Е.В., Тевелев Арк.В., Филимонов С.В., Никитин М.Ю., Овсянников Г.Н., Семиколенных Е.С. (2021а) Эффузивоподобные породы в составе гипабиссальных интрузивов габбро-долеритов мезозойд Горного Крыма и трапповой формации Восточно-Сибирской платформы (рудоносных и безрудных). *Петрология и геодинамика геологических процессов*. Иркутск. 3, 107–109.
- Спиридонов Э.М., Нурмухаметов Ф.М., Коротаева Н.Н., Куликова И.М., Сидорова Н.В. (2013) Позднемагматический ортит-(Се) в золотоносных гранитоидах Шарташского интрузива, Средний Урал. *Уральский геологический журнал*. (3), 46–55.
- Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н. (2024) Псевдоморфозы псевдобрукита и псевдорутила, титанита, рутила по армолколиту, титаномagnetиту и ильмениту в низкоградно метаморфизованных интрузивных породах Горного Крыма. *Новые данные о минералах*. 58 (2), 36–45.
- Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н., Филимонов С.В., Кравченко С.М., Семиколенных Е.С., Путинцева Е.В., Тевелев Арк.В., Шалимов И.В., Лавров О.Б., Кривицкая Н.Н., Фролова Ю.В., Ладыгин В.М. (2023) Петрогенетическая схема Н.Л. Боуэна и акцессорные минералы Sr, Ti, Zr, REE, Y. Армолколит и продукты его превращений. *В кильватере большого корабля: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики*. Черноголовка, ИЭМ РАН, 47.
- Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С., Лысенко В.И., Филимонов С.В., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. (2019а) Армолколит-содержащие островодужные плагиоцерцолиты и оливиновые габбро-норит-долериты Балаклавы, Горный Крым. *Вестник МГУ. Серия Геология*. (3), 51–60.
- Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М. (1990) Магматические образования Горного Крыма. Статьи 1 и 2. *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. 65 (4), 119–134; 65 (6), 102–112.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Никитин М.Ю., Овсянников Г.Н., Коротаева Н.Н. (2021б) Керсутитовые лампрофиты мелового возраста в долине реки Бодрак в Горном Крыму. *Петрология и геодинамика геологических процессов*. Иркутск. 3, 127–129.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н. (2018) Цирконолит, бадделит, циркон и торит островодужных кварцевых габбронорит-долеритов интрузива Аю-Даг (Горный Крым). *Вестник МГУ. Серия Геология*. (5), 70–78.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н. (2019б) Чевкинит-(Се) и перрьерит-(Се) островодужных кварцевых габбронорит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым. *Записки РМО*. 148 (4), 61–79.
- Ферсман А.Е. (1940) Пегматиты. Том 1. Гранитные пегматиты. М.-Л.: изд. АН СССР. 712 с.
- Фирсов Л.В. (1963) Абсолютная датировка изверженных пород Крыма в качестве реперных образований для байоса. *Известия АН СССР. Геология*. (4), 24–34.
- Хаин В.Е. (1984) Региональная геотектоника. М.: Недра. 341 с.
- Хвостова В.А. (1962) Минералогия ортита. *Труды. ИМГРЭ*. Выпуск 11. 121 с.
- Хейнрих Э.У. (1962) Минералогия и геология радиоактивного минерального сырья: Пер. с англ. – М.: Иностранной литературы, 606 с.

- Якубова В.В. (1972) Группа эпидота. В кн.: *Минералы. Т. III. Вып. 1. Силикаты с одиночными и двойными кремнекислородными тетраэдрами*. М.: Наука. 720–766.
- Alekseev V.I., Marin Yu.B., Gembitskaya T.M. (2013) Allanite-(Y) in areas of ongonite magmatism in the Far East; Isomorphism and petrogenetic implications. *Geology of Ore Deposits*. **55** (7), 503–514.
- Barth S., Oberli F., Meier M. (1994) Th-Pb versus U-Pb isotope systematics in allanite from co-genetic rhyolite and granodiorite: implications for geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* **124** (1–4), 149–159.
- Burt D.M. (1989) Composition and phase relations among rare earth element minerals. *Geochem. Mineral. Rare Earth Elements. Rev. Mineral.* **21**, 259–307.
- Cassilas R., Nagy G., Panto G., Brandle J., Forizs I. (1995) Occurrence of Th, U, Y, Zr, and REE-bearing accessory minerals in late-variscan granitic rocks from the Sierra de Guadarrama (Spain). *Eur. J. Mineral.* **7** (4), 989–1006.
- Chesner C.A., Ettlinger A.D. (1989) Composition of volcanic allanite from the Toba tuffs, Sumatra, Indonesia. *Am. Mineral.* **74** (7–8), 750–758.
- Congdon R.D., Nash W.P. (1991) Eruptive pegmatite magma: rhyolite of the Honeycomb Hills, Utah. *Am. Mineral.* **76** (7–8), 1261–1278.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussmann J. (1986) Rock-forming minerals. I B. Disilicates and ring silicates. (2nd edition). London: Longman. 151 p.
- Ercit T.S. (2002) The mess that is “allanite”. *Can. Mineral.* **40** (5), 1411–1419.
- Finger F., Broska I., Roberts M.P., Schermaier A. (1988) Replacement of primary monazite by apatite – allanite – epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *Am. Mineral.* **83** (3–4), 248–258.
- Fleischer M.A. (1985) Summary of the variations in relative abundance of the lanthanides and yttrium in allanites and epidotes. *Bull. Geol. Soc. Finl.* **57** (1), 151–155.
- Fron del J.W. (1964) Variation of some rare earth in allanite. *Am. Mineral.* **49** (9–10), 1159–1177.
- Giere R., Sorensen S.S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. In: *Epidotes* (A. Liebscher, G. Franz, eds.). *Rev. Mineral. Geochem.* **56** (1), 431–493.
- Gramaccioli C.M. (1978) Mineralien der Alpen. Stuttgart: Kosmos. 503 p.
- Gromet L.P., Silver L.T. (1983) Rare earth elements distribution among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **47** (5), 925–939.
- Hanson S.L. (2012) Allanite-(Nd) from the Kingman feldspar mine, Mohave pegmatite district, northwestern Arizona, USA. *Can. Mineral.* **50** (4), 815–824.
- Hobbs W.H. (1889) On the paragenesis of allanite and epidote as rock-forming minerals. *Amer. J. Sci.* **3** (225), 223–228.
- Holtstam D., Andersson O.B., Mansfeld J. (2003) Ferriallanite-(Ce) from the Bastnäs deposit, Västmanland, Sweden. *Can. Mineral.* **41** (5), 1233–1240.
- Hoshino M., Kimata M., Shimizu M., Nishida N., Fujiwara T. (2006) Allanite-(Ce) in granitic rocks from Japan: genetic implications of patterns of REE and Mn enrichment. *Can. Mineral.* **44** (1), 45–62.
- Lacroix A. (1910) Mineralogie de la France et de ses colonies. **4**. Paris. 903 p.
- Mulrooney D., Rivers T. (2005) Redistribution of the rare-earth elements among coexisting minerals in metamorphic rocks across the epidote-out isograd: an example from the St. Anthony complex, northern Newfoundland, Canada. *Can. Mineral.* **43** (1), 263–294.
- Murata K.L., Rose H.I., Carron M.K., Glass J.J. (1957) Systematic variation of rare-earth elements in cerium-earth minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **11** (3), 141–161.
- Orlandi P., Pasero M. (2006) Allanite-(La) from Buca della Vena mine, Apuan Alps, Italy, in epidote group minerals. *Can. Mineral.* **44** (1), 63–68.
- Pan Y., Fleet M.E. (1991) Vanadian allanite-(La) and vanadian allanite-(Ce) from the Hemlo gold deposit, Ontario. *Mineral. Mag.* **55** (381), 497–507.
- Philpotts A.R., Ague J.J. (2009) Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. 667 p.
- Pieczka A., Golebiewska B., Wlodek A., Stachowicz M., Jokubas-kas P., Kotowski J., Nejbert K., Szuszkiewicz A., Woźniak K. (2024) Allanite-(Sm), $\text{CaSm}(\text{Al}_2\text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$, the third samarium mineral from Jordanów Śląski, Lower Silesia, Poland. *Am. Mineral.* **110**, 808–819.
- Prol-Ledesma R.-M., Melgarejo J.C., Martin R.F. (2012) The El Muerto “NYF” granitic pegmatite, Oaxaca, Mexico, and its striking enrichment in allanite-(Ce) and monazite-(Ce) *Can. Mineral.* **50** (4), 1055–1076.
- Sawka W.N., Chappel B.W., Norrish K. (1984) Light-rare-earth elements zoning in sphene and allanite during granitoid fractionation. *Geology*. **12** (3), 131–134.
- Schandl E.S., Gorton M.P. (1991) Postore mobilization of rare earth elements at Kidd Creek and other Archean massive sulfide deposits. *Econ. Geol.* **86** (7), 1546–1553.
- Smith M.P., Henderson P., Jeffris T. (2002) The formation and alteration of allanite in skarn from the Beinn an Dubhaich granite aureole, Skye. *Eur. J. Mineral.* **14** (3), 471–486.
- Smith W.L., Franck M.L., Sherwood A.M. (1957) Uranium and thorium in the accessory allanite of igneous rocks. *Amer. Mineral.* **42** (5–6), 367–378.
- Treloar P.J., Charnley N.R. (1987) Chromian allanite from Outokumpu, Finland. *Canad. Mineral.* **25** (3), 413–418.
- Ueda T. (1955) The crystal structure of allanite $\text{OH}(\text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})\text{Al}_2\text{OSi}_2\text{O}_7\text{SiO}_4$. *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B*, **22** (2), 145–163.
- Wing B.A., Ferry J.M., Harrison T.M. (2003) Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites: petrology and geochronology. *Contrib. Mineral. Petrol.* **145**, 228–250.

**Ti FERRIALLANITE-(Ce), Ti AND Ti-V ALLANITE-(Ce),
ALLANITE-(Ce), ALLANITE-(Y), AND REE EPIDOTE
IN BIOTITE-BEARING QUARTZ GABBROIDS
AND PLAGIOGRANITOIDS WITHIN THE ISLAND-ARC
PERVOMAYSK-AYUDAG COMPLEX
OF THE MOUNTAIN CRIMEA**

© 2025 E. M. Spiridonov^{a, *}, G. N. Ovsyannikov^{a, c}, S. V. Filimonov^a,
E. S. Koybagarova^b, N. N. Korotaeva^a

^a*Lomonosov Moscow State University,
Vorobyovy Gory, 1, Moscow GSP-1, 119991 Russia*

^b*Saint Petersburg State University,
V/O, Dekabristov per., 16, Saint-Petersburg, 199155 Russia*

^c*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Piip Boulevard, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia 683000*

*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Received February 13, 2025; revised April 7, 2025; accepted April 24, 2025

The unique association of rare-earth minerals of the epidote group, as well as the evolution of lanthanides and actinides, titanium and vanadium in their composition are described. Allanite-(Ce), often with a ferriallanite-(Ce) core, an outer zone of allanite-(Y) and a rim of REE epidote, forms pseudomorphs after chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce), as well as isolated crystals. They form intergrowths with biotite, developing near it in quartz gabbro-norite-dolerites and gabbro-norite-diorites of the island-arc mafic hypabyssal Pervomaysk-Ayudag complex within Mountain Crimea. Zonal allanite-(Ce) of similar composition, accompanied by REE epidote rims, is widespread in quartz diorites and plagiogranites of the same complex, where it is often developed in granophyric quartz-oligoclase intergrowths. Brown ferriallanite-(Ce) enriched in Ti ($\pm$ Th) forms cores in brown allanite-(Ce) crystals enriched in Ti ($\pm$ V) (up to 4.9 wt. % TiO₂). Allanite-(Ce) enriched in titanium (up to 3.5 wt. % TiO₂), which replaced ilmenite, is extremely rich in vanadium (up to 4.5 wt. % V₂O₃). Light colored low-titanium allanite-(Ce) has grown on titanium enriched allanite-(Ce). The distribution of lanthanides and yttrium in allanite-(Ce) and ferriallanite-(Ce) is: Ce > La > Nd > Y > Pr > Sm ~ Dy ~ Gd > Er ~ Tb. The outer zones of allanite-(Ce) crystals and rare-earth epidote are relatively enriched in Nd, whereas Nd > La in some instances. The ratio of yttrium and lanthanides in allanite-(Y) is specific: Y >> Ce ~ Nd ~ Dy ~ Er > La ~ Gd ~ Yb. Allanite-(Ce) of Crimean gabbroids is noticeably richer in La, Ti, V and poorer in Y, Sm, Gd in comparison with allanite-(Ce) of Crimean plagiogranitoids. According to (Fleischer, 1985), the distribution of lanthanides and yttrium in allanite-(Ce) of Crimean plagiogranitoids is close to the similar distribution in standard granites, differing in an increased proportion of Gd. The coloration causes and matter sources for magmatic Crimean allanite formation are considered. Allanite was partially replaced by monazite-(Ce) during the processes of regional metamorphism under the conditions of the prehnite-pumpellyite facies.

Keywords: ferriallanite-(Ce), allanite-(Ce), allanite-(Y), REE epidote, island-arc gabbroids — plagiogranitoids Mountain Crimea