

УДК 549.514.8-9:551.22(477.75)

Э.М. Спиридонов¹, Н.Н. Коротаева², Н.Н. Кривицкая³, В.М. Ладугин⁴,
Г.Н. Овсянников⁵, Е.В. Путинцева⁶, Е.С. Семиколенных⁷, Ю.В. Фролова⁸

ОСТРОВОДУЖНЫЕ АВГИТ-БИТОВНИТ-ЛАБРАДОРОВЫЕ ДАЦИТЫ КАРАДАГА, КРЫМ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Санкт-Петербургский государственный университет, Петрографический музей, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
Saint-Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya embankment, 7–9

Островодужные известково-щелочные дациты (66,7% SiO₂, 3,4% Na₂O, 1,9% K₂O) слагают субвулканическое тело среди туфов андезитов и трахиандезитов на востоке Карадагского вулканического массива Горного Крыма. Особенности состава дацитов — обилие вкрапленников плагиоклаза (центральные зоны — битовнит Ca_{75–72}Na_{24–27}K_{0,5–1}; промежуточные и внешние зоны — лабрадор Ca_{67–52}Na_{32–47}K₁) и малотитанистого авгита (ядра — авгит Ca₄₄Mg₄₅Fe₁₁ с 4,5% Al₂O₃; промежуточные и внешние зоны — авгит Ca_{43–41}Mg_{41–38}Fe_{16–21} с 1–2% Al₂O₃). Срастания с авгитом образуют титаномагнетит, ильменит и апатит. Низкомагнийевый титаномагнетит обогащен марганцем (до 4,5 масс.% MnO) и цинком (до 1,6% ZnO), содержит от 39 до 28% минала ульвошпинели. Бедный марганцем ильменит содержит от 10 до 25 мол.% минала гематита, что свидетельствует о кристаллизации при повышенной *f*O₂, т.е. о насыщенности расплава водой. Апатит беден Sr, Се, S. Проявлен тренд со стандартным накоплением фтора — от хлор-гидроксил-фторапатита до фторапатита. Цементирующая масса дацитов риолитового состава (77,3% SiO₂, 3,3% Na₂O, 2,5% K₂O) сложена микролитами лабрадора Ca_{52–50}Na_{46–48}K_{2–3}, промежутки между ними заполняют кварц и небольшое количество андезина Ca_{49–46}Na_{49–52}K_{2–3}, олигоклаза Ca₂₇Na₆₈K₅, анортоклаза. Характерная особенность описанных дацитов — богатство плагиоклаза анортитовым компонентом, что типично для островодужных вулканитов. Температура кристаллизации авгита ~1050–950 °С. Температура кристаллизации раннего зарождения ассоциирующих титаномагнетита и ильменита ~900 °С, *f*O₂ на одну логарифмическую единицу выше буфера QFM, Температура кристаллизации их позднего зарождения — ~880 °С, *f*O₂ на 2 единицы выше буфера QFM, что свидетельствует о кристаллизации при повышенной *f*O₂, т.е. о богатстве расплава водой.

Ключевые слова: битовнит, лабрадор, авгит, титаномагнетит, ильменит, апатит островодужных дацитов Карадага, Крым.

Island-arc calc-alkaline dacites (66,7% of SiO₂, 3,4% of Na₂O, 1,9% of K₂O) compose a subvolcanic body among tuffs, andesites and trachyandesites in the east of the Kara-Dag volcanic massif of the Rocky Crimea. The unique features of dacites is abundance of plagioclase phenocrysts (the central zone is bytownite Ca_{75–72}Na_{24–27}K_{0,5–1}; the intermediate and external zones is labradorite Ca_{67–52}Na_{32–47}K₁) and low-Ti augite (augite Ca₄₄Mg₄₅Fe₁₁ with 4,5% of Al₂O₃ composes the core; the intermediate and external zones is augite Ca_{43–41}Mg_{41–38}Fe_{16–21} with 1–2% Al₂O₃). Titanomagnetite, ilmenite and apatite form intergrowths with augite. Low-magnesian titanomagnetite is enriched with manganese (up to 4,5 wt.% MnO) and zinc (up to 1,6% of ZnO); it contains from 39 to 28% of ulvospinel minal. Ilmenite, poor in Mn, contains from 10 to 25 mol.% of hematite minal that demonstrates the crystallization with the raised

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, профессор; *e-mail:* ernstspiridon@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, инженер; *e-mail:* mineral@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, ст. науч. с.; *e-mail:* nnkriv@geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, ст. науч. с.; *e-mail:* skalka@geol.msu.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, студент; *e-mail:* george2098@mail.ru

⁶ Санкт-Петербургский государственный университет, куратор петрографического музея; *e-mail:* lputintseva@mail.ru

⁷ Санкт-Петербургский государственный университет, науч. с.; *e-mail:* geny_shen@mail.ru

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, доцент; *e-mail:* ju_frolova@mail.ru

fO_2 , in other words, the water saturation of fusion. Apatite is poor in Sr, Ce and S. The trend with standard accumulation of fluorine from chlorine-hydroxyl-fluorapatite up to fluorapatite is shown. Plagioclase microlites — labradorite $Ca_{52-50}Na_{46-48}K_{2-3}$ composes the cementing mass of rhyolitic composition (77,3% SiO_2 , 3,3% Na_2O , 2,5% K_2O) with quartz, small amounts of andesine $Ca_{49-46}Na_{49-52}K_{2-3}$, oligoclase $Ca_{27}Na_{68}K_5$ and anorthoclase in interstitions. The speciality of the described dacites is plagioclase wealth in anorthite component, what is typical for island-arc volcanites. The crystallization temperature of augite is $\sim 1050-950$ °C. The crystallization temperature of associated titanomagnetite and ilmenite of early origin is ~ 900 °C, fO_2 exceed by 1 logarithmic unit the QFM buffer, their late origin crystallization temperature is ~ 880 °C, fO_2 exceed by 2 logarithmic units the QFM buffer.

Key words: island-arc dacites, bytownite, labradorite, augite, titanomagnetite, ilmenite, apatite, Kara-Dag, Crimea.

Введение. Цепочка вулканических массивов Горного Крыма протянулась от Севастополя (Балаклавы) на западе до Карадага на востоке. Карадагский массив как палеовулкан описал еще А.А. Прозоровский-Голицын [1891], это первое описание палеовулкана в нашей стране. Разнообразные типы вулканических пород — туфы, лавы, лавовые брекчии, гиалокластиты, породы субвулканических тел, тефроиды, туффиты, туфопесчаники описаны в работах А.Е. Лагорио [1887], С.П. Попова [1899, 1938], П.Н. Чирвинского [1916], А.Ф. Слудского [1911], В.И. Вернадского [1921], В.Ф. Пчелинцева [1927], Ф.Ю. Левинсона-Лессинга [1933, 1940], В.И. Лучицкого [1939], М.В. Муратова [1960, 1973], И.Н. Ремизова [1962], В.И. Лебединского с соавторами [1962, 1988], Ю.М. Довгала с соавторами [1991], Э.М. Спиридонова [1990, 2017], М. Мейера [Meijers et al., 2010]. А.Ф. Слудский обнаружил морскую фауну в известняковом цементе туфов Карадага, т.е. доказал субмаринное происхождение вулкаников. В.Ф. Пчелинцев определил позднебайосский возраст морской фауны из цемента туфов и гиалокластитов. Среди перечисленных работ особое место занимает классическая монография Ф.Ю. Левинсона-Лессинга [Левинсон-Лессинг, Дьяконова-Савельева, 1933] с петрографической картой Карадагского вулканического массива масштаба 1:25 000.

После работ Ф.Ю. Левинсона-Лессинга карадагскую вулканическую серию выделяли как раннегеосинклинальную спилит-кератофировую формацию [Муратов и др., 1960; Лебединский, Макаров, 1962; Муратов, 1973]. Е.Е. Милановский и Н.В. Короновский рассматривали вулканические толщи Горного Крыма как орогенные, т.е. позднегеосинклинальные или послегеосинклинальные [Милановский, Короновский, 1973]. Э.М. Спиридонов установил, что карадагская вулканическая серия по совокупности геологических и петрогеохимических признаков не раннегеосинклинальная, а островодужная [Спиридонов и др., 1990]. Исследования Ф.Ю. Левинсона-Лессинга были проведены на передовом уровне начала XX в., в настоящее время возможности для изучения горных пород существенно иные, поэтому представляется необходимым детальное описание разнообразных типов вулканических пород Карадага. Одно из них приведено ниже.

Геология Горного Крыма. Горный Крым — часть грандиозной Альпийско-Гималайской складчатой системы [Хаин, 2001]. Горный Крым — мезозойское покровно-складчатое сооружение, состоящее из северной Лозовской и южной Горно-Крымской тектонических зон [Милеев и др., 2004]. Значительную часть складчатого комплекса Горного Крыма слагают образования островодужной стадии. Это главным образом терригенные флишевые толщи таврической и эскиординской серий (T_2-J_1), сложно дислоцированные и несогласно перекрытые среднеюрскими угленосными конгломерато-песчано-глинистыми толщами, которые заметно дислоцированы. По геофизическим данным мощность блоков терригенных пород до 4,5 км. Более древние толщи слагают ядра антиклинальных структур — Качинского, Южнобережного и Туакского поднятий [Муратов, 1973].

Терригенные толщи пересечены и контактово метаморфизованы небольшими плутонами раннебайосских кварцевых габбро-норит-долеритов и близких пород первомайско-аюдагского интрузивного комплекса [Спиридонов и др., 1990]. К этому комплексу принадлежит большая часть интрузивов мезозойского Горного Крыма. Интрузивы первомайско-аюдагского комплекса пересечены жерловинами и дайками базальтов, андезитов и пикритов позднебайосской островодужной карадагской вулканической серии [Спиридонов и др., 1990]. Вулканиды карадагской серии несогласно залегают на дислоцированной толще флиша эскиординской серии (T_2-J_1) в Лозовской зоне [Никитин, Болотов, 2006, 2007] и на дислоцированной толще флиша таврической серии (T_2-J_1) в Горно-Крымской зоне [Спиридонов и др., 2017].

Позднебайосская островная дуга, в значительной части субмаринная, в виде цепочки вулканических массивов и субвулканических тел карадагской серии протягивается от Севастополя (Балаклавы) на западе до Карадага на востоке Крыма. Вулканиды карадагской серии обладают типичными островодужными петрохимическими характеристиками, что показано в работе [Спиридонов и др., 1990] и подтверждено позднейшими петрогеохимическими исследованиями [Meijers et al., 2010]. Вулканиды карадагской серии запада Крыма наименее щелочные, близки к толеитовым, среди них минимальна доля кремнекислых пород.

Вероятно, они возникли во внешней «приокеанической» зоне островной дуги. Вулканы Карадага наиболее щелочные и наиболее калийные по составу, среди них немало шшонитов — латитов, повышена доля кремнекислых пород. Вероятно, они возникли в тыловой («приконтинентальной») зоне вулканической островной дуги [Спиридонов и др., 1990].

Образования более молодые, чем карадагская серия, представлены интрузивами фаялитовых плагиогранитов средне-позднеюрского кастельского комплекса, мощными терригенно-карбонатными толщами верхов средней и поздней юры с горизонтами эвапоритов. Все эти образования тектонизированы и дислоцированы. Их несогласно перекрывают практически недислоцированные отложения мела, палеогена и неогена.

Карадагский вулканический массив. Крупнейший и наиболее сложный по строению из вулканических массивов мезозойского Горного Крыма — Карадагский — расположен на стыке среднеюрских вулканических дуг — Южнокрымской субширотного простирания и Кавказской северо-западного простирания. Карадагский вулканический массив находится на восточном склоне Туакского поднятия [Муратов, 1973; Милеев и др., 2004]. По данным предшествующих исследователей [Слудский, 1911; Муратов и др., 1960; Лебединский, Соловьев, 1988; Довгаль и др., 1991; Милеев и др., 2004], Карадагский вулканический массив размещен среди осадочных толщ среднеюрского возраста. Нами установлено, что вулканическая постройка возникла на дислоцированной толще таврической серии (T_2-J_1), выходы которой примыкают к вулканическому массиву с запада и северо-востока [Спиридонов и др., 2017]. На западе вулканический массив ограничен крупноамплитудным разломом северо-западного простирания. На севере и северо-востоке вулканический массив перекрыт терригенными толщами келловей—оксфорда. Размеры основной обнаженной части вулканического массива $\sim 6 \times 1$ км.

Большую часть Карадага составляют переслаивающиеся туфы, агломератовые туфы и туфобрекчии, лавы и лавовые брекчии, гиалокластиты, туффиты, тефроиды, туфо-известняковые породы андезитового, базальтового, трахиандезитового, трахибазальтового, дацитового, трахидацитового, риолитового состава карадагской свиты. Видимая мощность свиты не менее 700 м. Лавово-туфовая толща пересечена множеством субвулканических тел и даек карадагского субвулканического комплекса: 1-я фаза — базальты, долериты, трахиандезито-дациты, оливиновые базальты, трахибазальты, тефриты, оливиновые тефриты; 2-я фаза — трахиандезито-дациты, андезиты, дациты, риодациты, трахириолиты, базальты; 3-я фаза — флюидалльные риолиты, риодациты, лавовые брекчии риолитов.

Карадагский вулканический массив интенсивно тектонизирован — «поставлен на голову» [Левинсон-Лессинг и др., 1933; Муратов и др., 1972; Лебединский, Соловьев, 1988; Довгаль и др., 1991]. По нашим наблюдениям, Карадагская вулканическая постройка разорвана на три субширотно ориентированных блока: южный блок опущен на дно Черного моря, средний — вулканический массив Большого Карадага, северный — вулканический массив Малого Карадага и Святой горы. Большой и Малый Карадаг разделяет тектоническая пластина осадочных толщ (J_2), которые несколько надвинуты на Большой Карадаг. Все наблюдаемые контакты вулканитов с подстилающей вулкан Карадаг и смятой в сложные (но мягких очертаний) складки флиша таврической серии с массой линзоконкреций сидерита — тектонические. И Большой, и Малый Карадаг разбиты системами разномасштабных разломов, вдоль которых измененные вулканиты обильно пропитаны селадонитом и гейландитом с мельчайшими включениями лепидокрокита или гематита [Спиридонов и др., 2017].

Методы исследования. Физические свойства дацитов и их химический состав определены в лабораториях геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Состав минералов установлен с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ «Jeol JSM-6480 LV» (лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова). Методика измерений стандартная [Рид, 2008]. Фотографии в режиме отраженных электронов и микронзондовые анализы минералов выполнила аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева.

В таблицах и на рисунках приведена единая нумерация анализов минералов.

Результаты исследований и их обсуждение.
Островодужные дациты Карадага. Субвулканическое тело дацитов 2-й фазы карадагского комплекса размером 150×50 м, образцы из которого описаны в статье, расположено в восточной части Карадагского вулканического массива, на юге хр. Магнитный. Координаты точки отбора $N 44^\circ 55'50,7''$, $E 35^\circ 14'19,8''$, $H = 368$ м. Породы субвулканического тела — массивные порфировидные дациты зелено-серого цвета с микрозернистой основной массой, слаботрещинчатые. Породы содержат редкие и мелкие $0,2-0,3$ мм округлые или неправильной формы миндалины, заполненные железистым хлоритом. Количество эпигенетических минералов (хлорит, селадонит и др.) небольшое.

Химический состав дацитов (масс.%): SiO_2 66,72; TiO_2 0,71; P_2O_5 0,16; Al_2O_3 16,43; FeO 3,89; MnO 0,11; MgO 1,01; CaO 5,01; Na_2O 3,39; K_2O 1,86; ппп 0,67; сумма 99,96%, он отвечает стандартным известково-щелочным дацитам [Заварицкий,

1955; Фролова, Бурикова, 1997]. Химический состав тщательно отделенной от вкрапленников плагиоклаза, авгита и титаномагнетита цементирующей массы дацитов (масс.%) следующий: SiO_2 77,34; TiO_2 0,24; P_2O_5 0,11; Al_2O_3 12,61; FeO 1,64; MnO 0,06; MgO 0,21; CaO 2,31; Na_2O 3,34; K_2O 2,52; ппп 0,20; сумма 100,58%, отвечает известково-щелочным риолитам [Заварицкий, 1955].

Изученные дациты Карадага юрского возраста отличаются повышенными значениями упруго-плотностных свойств по сравнению с их четвертичными аналогами, исследованными авторами на юге Камчатки [Фролова и др., 2017]. Они существенно плотнее ($\rho=2,63\div 2,64$ г/см³), чем дациты Камчатки ($\rho=1,74\div 2,43$ г/см³). Для них характерна малая открытая пористость ($n_0 < 1\%$), поскольку, в отличие от четвертичных пород ($n_0=4\div 14\%$), порово-микротрещинное пространство заполнено вторичными минералами. Упругие свойства также выше: скорость продольных волн $V_p = 4,7\div 4,8$ км/с для дацитов Карадага и $V_p = 2,2\div 4,1$ км/с для дацитов Камчатки; модуль упругости $E_y = 43\div 45$ для дацитов Карадага, для сравнения — $E_y = 8\div 29$ у дацитов Камчатки. Отметим, что по петрофизическим свойствам дациты Карадага весьма близки к андезитам и андезибазальтам этого региона и других районов Крыма [Фролова и др., 2018]. Между тем вулканы кремнекислого, среднего и среднего-основного состава, как правило, заметно отличаются по свойствам. По-видимому, широко проявленный низкоградный метаморфизм [Спиридонов и др., 2017] нивелирует их различия, и, превращаясь в метавулканы, породы изначально различного состава становятся близки по свойствам.

Вкрапленники плагиоклаза размером до 2 мм слагают до 35% объема дацитов, вкрапленники ав-

гита размером до 1 мм — около 10% объема пород, в отдельных участках до 25%. Небольшого размера вкрапленники слагают титаномагнетит, ильменит, апатит и их сростания. Изредка наблюдаются гломеропорфировые сростания плагиоклаза с авгитом и титаномагнетитом, поперечник сростаний до 6 мм. Повышенная плотность описываемых дацитов, вероятно, обусловлена обилием в породах титаномагнетита. Кристаллы апатита изредка содержат включения мелких табличек моноклинного пирротина Fe_7S_8 . Цементирующая масса сложена плагиоклазом, кварцем, щелочным полевым шпатом, титаномагнетитом, редкими ильменитом и апатитом.

Плагиоклаз. Особенности изученных субвулканических дацитов — обилие вкрапленников плагиоклаза размером 0,5–2 мм, сложно- и осцилляционно-зональных. Их центральные зоны слагает зональный битовнит $\text{Ca}_{75-72}\text{Na}_{24-27}\text{K}_{0,5-1}$; промежуточные и внешние зоны — зональный лабрадор $\text{Ca}_{67-52}\text{Na}_{32-47}\text{K}_1$. Вариации состава кристаллов — вкрапленников от центра к краю, Ca–Na–K (атом. количество): 1) 75,2–24,4–0,4 → 66,7–32,8–0,5 → 54,4–44,6–1,0 → 63,0–36,1–0,9; 2) 72,0–27,5–0,5 → 65,8–33,7–0,5 → 59,4–39,9–0,7 → 58,8–40,2–1,0; 3) 61,0–38,4–0,6 → 52,4–46,6–1,0 → 54,5–44,5–1,0. Внешние зоны вкрапленников плагиоклаза несколько богаче калием. Цементирующая масса (рис. 1) сложена микролитами натриевого лабрадора $\text{Ca}_{52-50}\text{Na}_{46-48}\text{K}_{2-3}$ размером до 0,08–0,03 мм, промежутки между ними заполняют кварц и в небольших количествах андезин $\text{Ca}_{49-46}\text{Na}_{49-52}\text{K}_{2-3}$, олигоклаз и анортоклаз. Микролиты натриевого лабрадора обычно не зональные, состав различных лейст близок (Ca–Na–K, атом. количество): 1) 52,1–46,3–1,6; 2) 51,9–46,3–1,8; 3) 51,8–45,6–2,6; 4) 50,8–47,2–2,0; 5) 50,5–47,2–2,3. Лабрадор

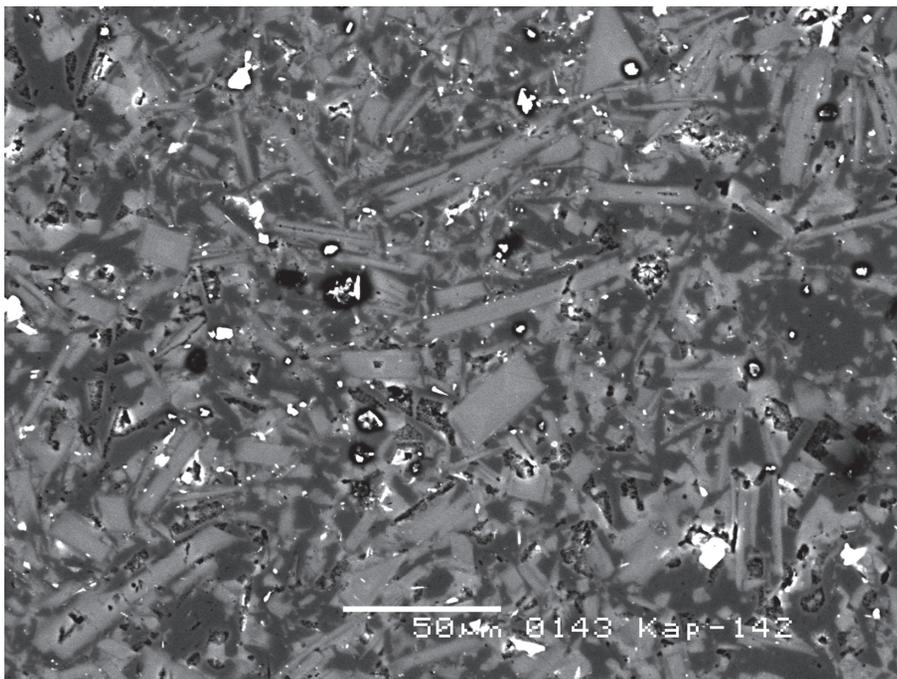


Рис. 1. Цементирующая масса дацитов Карадага. Лейсты лабрадора (серое). В промежутках между ними — кварц (темно-серый), титаномагнетит и ильменит (белое). В отраженных электронах

Таблица 1

Химический состав (масс.%) авгита вкрапленников островодужных дацитов, Карадаг, Крым

Компо- ненты	1*	2	3	4	5	6	7	8
CaO	20,99	20,52	20,45	20,67	20,58	20,53	20,40	19,67
Na ₂ O	0,13	0,30	0,24	0,28	0,35	0,33	0,35	0,32
MgO	15,79	14,48	14,47	14,07	14,03	13,74	13,39	13,24
FeO	5,05	8,29	8,31	8,81	8,90	9,13	9,01	10,73
MnO	0,17	0,57	0,53	0,63	0,65	0,74	0,61	0,73
SiO ₂	50,59	51,96	51,44	51,84	52,14	51,90	51,23	51,49
Al ₂ O ₃	4,28	1,16	1,48	1,54	1,14	1,13	1,56	1,85
Fe ₂ O ₃	2,01	1,73	2,01	1,28	1,73	1,76	2,11	1,73
TiO ₂	0,38	0,27	0,41	0,31	0,26	0,14	0,29	0,26
Сумма	99,39	99,28	99,34	99,43	99,78	99,40	98,95	100,02
Число атомов в формуле в пересчете на 4 атома металлов								
Ca	0,832	0,826	0,824	0,832	0,827	0,830	0,836	0,795
Na	0,009	0,022	0,017	0,020	0,025	0,024	0,026	0,023
Mg	0,872	0,812	0,811	0,789	0,786	0,772	0,755	0,744
Fe ²⁺	0,156	0,261	0,261	0,277	0,279	0,288	0,285	0,338
Fe ³⁺	0,056	0,049	0,057	0,036	0,049	0,050	0,060	0,049
Mn	0,005	0,018	0,017	0,020	0,021	0,024	0,020	0,023
Al ^{VI}	0,059	0,004	0,001	0,017	0,006	0,008	0,010	0,021
Ti	0,011	0,008	0,012	0,009	0,007	0,004	0,008	0,007
Сумма	2	2	2	2	2	2	2	2
Si	1,872	1,953	1,935	1,949	1,956	1,958	1,940	1,939
Al ^{IV}	0,128	0,047	0,065	0,051	0,044	0,042	0,060	0,061
Сумма	2	2	2	2	2	2	2	2
Ca#	43,6	42,7	42,3	43,1	42,9	43,0	43,5	41,5
Mg#	45,2	40,8	40,8	40,0	39,6	38,8	38,1	37,7
Fe#	11,2	16,5	16,9	16,9	17,5	18,2	18,4	20,8
f, %	19,9	28,8	29,2	29,7	30,7	31,9	32,6	35,5

Примечания. Здесь и далее количество FeO и Fe₂O₃ рассчитано по стехиометрии.

Ca#, Mg#, Fe# — содержание миналов волластонита, энстатита и ферросилита соответственно; f — железистость. * Номера анализов.

цементирующей массы в два раза богаче калием, чем лабрадор вкрапленников. Кальциевый андезин слагает тонкие каймы вокруг некоторых лейст лабрадора, реже — обособленные мелкие лейсты. Микролиты кальциевого андезина незональные, состав различных лейст близок (Ca–Na–K, атом. количество): 1) 49,2–49,0–1,8; 2) 48,8–47,9–3,3; 3) 48,3–49,6–2,1. Крайне редко в промежутках между лейстами натриевого лабрадора развиты мелкие выделения олигоклаза, обогащенного калием, его состав Ca₂₇Na₆₈K₅. Корректный состав анортоклаза цементирующей массы установить не удалось.

Авгит слагает вкрапленники размером от 0,1÷0,3×0,1 до 1×0,4 мм и сростания с вкрапленниками плагиоклаза. Август по составу малотитанистый и низкощелочной (табл. 1). Состав ядер зональных кристаллов авгита отвечает Ca₄₄Mg₄₅Fe₁₁; август обогащен алюминием, содержит 4,5 масс.% Al₂O₃, его железистость 19,9 (анализ 1, табл. 1).

Таблица 2

Химический состав (масс.%) титаномагнетита островодужных дацитов, Карадаг, Крым

Компо- ненты	9	10	11	12	13	14	15	16
MgO	0,86	0,27	0,36	0,22	0,69	0,45	0,70	1,18
FeO	39,48	39,99	36,06	38,52	38,20	35,27	37,10	37,72
MnO	3,20	2,81	4,48	2,85	2,06	2,89	3,01	0,66
ZnO	0,33	0,52	1,58	0,38	0,21	1,69	0,30	0,21
Fe ₂ O ₃	37,92	40,78	43,21	44,40	46,29	45,04	43,69	45,63
Al ₂ O ₃	2,96	1,23	1,21	0,82	0,92	1,47	3,54	2,60
V ₂ O ₃	0,48	0,32	0,63	0,31	0,28	0,59	0,62	0,61
TiO ₂	13,96	13,58	12,23	11,88	11,17	10,49	10,68	10,01
Сумма	99,19	99,50	99,77	99,38	99,82	97,89	99,64	98,62
Содержание миналов, мол.%								
MgAl ₂ O ₄	4,8	1,3	—	0,9	1,5	—	3,9	5,2
FeAl ₂ O ₄	0,8	—	—	—	—	—	3,1	—
ZnAl ₂ O ₄	0,9	1,5	2,7	1,0	0,6	3,4	0,8	0,6
FeV ₂ O ₄	0,7	0,5	1,0	0,5	0,5	0,9	1,0	1,0
Fe ₂ TiO ₄	39,3	38,6	34,7	34,0	31,7	30,4	29,9	28,4
FeFe ₂ O ₄	43,4	48,9	43,6	54,1	56,7	51,9	51,8	61,3
MnFe ₂ O ₄	10,1	9,0	14,3	9,2	6,6	9,4	9,5	2,1
MgFe ₂ O ₄	—	0,2	2,0	0,3	2,4	2,6	—	1,4
ZnFe ₂ O ₄	—	—	1,7	—	—	1,4	—	—

Примечания. Количество FeO и Fe₂O₃ рассчитано по стехиометрии. Ni, Cr — не обнаружены.

Овальные кристаллы авгита аналогичного состава слагают мелкие (до 0,2 мм) включения в битовните центральных зон вкрапленников плагиоклаза. Промежуточные и внешние зоны кристаллов авгита более железистые, содержат 1–2 масс.% Al₂O₃, их состав — Ca_{43–41}Mg_{41–38}Fe_{16–21}, железистость — 28,8–35,5 (ан. 2–8, табл. 1). Тренд эволюции состава авгита дацитов Карадага стандартный для островодужных вулканитов — заметен рост железистости при незначительном снижении кальциевости [Островская и др., 1972].

Титаномагнетит — один из распространенных минералов дацитов Карадага, слагает вкрапленники размером 0,1–0,6 мм в виде овальных кристаллов, их форма близка к октаэдру, а также скелетные кристаллы. Большая их часть образует сростания с августом. Размер кристаллов титаномагнетита в цементирующей массе до 0,02 мм. Титаномагнетит вкрапленников и цементирующей массы испытал окислительный распад и представлен матрицей титанистого магнетита с массой тонких пластинчатых ламелл ильменита и редкими мельчайшими выделениями шпинели. Титаномагнетит вкрапленников обогащен миналом ульвошпинели — от 39,3 до 34,0 мол.% (ан. 9–12, табл. 2). Титаномагнетит цементирующей массы содержит 31,7–28,4 мол.% ульвошпинели (ан. 13–16, табл. 2). В целом низкомагнезиальный титаномагнетит дацитов Карадага содержит (масс.%) 10–14 TiO₂, 0,3–0,6% V₂O₃, 0,7–4,5 (в среднем 2,75%) MnO, 0,2–1,7 (в среднем 0,65%) ZnO (табл. 2).

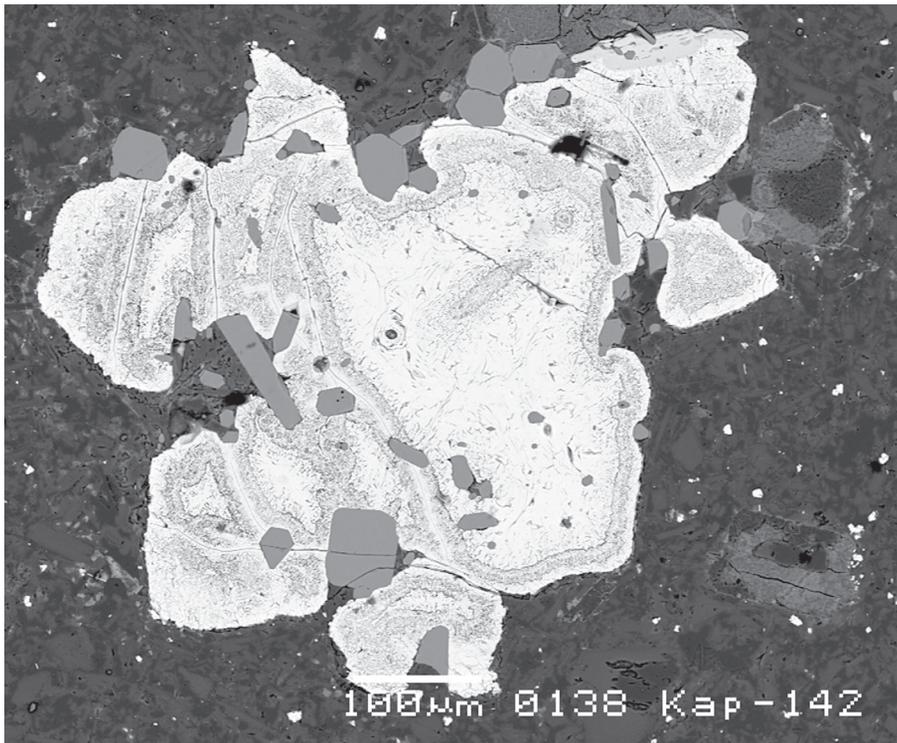


Рис. 2. Вкрапленник титаномагнетита (белый) в сростании с ильменитом-II (светло-серый, выше титаномагнетита) и апатитом (кристаллы серого цвета). Титаномагнетит в заметной степени замещен гипогенным лепидокрокитом (тонкий серый крап). В отраженных электронах

Таблица 3

Химический состав (масс.%) ильменита островодужных дацитов, Карадаг, Крым

Компоненты	17	18	19	20
MgO	1,88	0,86	1,53	0,83
FeO	38,27	35,36	33,32	33,54
MnO	1,05	0,77	0,67	0,66
ZnO	нпо	0,19	0,24	нпо
TiO ₂	47,47	42,07	41,06	39,71
Fe ₂ O ₃	9,96	20,98	23,18	25,02
Al ₂ O ₃	0,20	0,24	0,33	0,27
V ₂ O ₃	0,36	0,60	0,58	0,60
Сумма	99,19	101,07	100,91	100,63
Содержание мишалов, мол.%				
MgTiO ₃	7,1	3,2	5,7	3,1
FeTiO ₃	80,6	74,1	69,6	70,7
MnTiO ₃	2,2	1,6	1,4	1,4
ZnTiO ₃	—	0,3	0,4	—
Сумма	89,9	79,2	77,1	75,2
FeFeO ₃	9,5	19,8	21,8	23,8
AlAlO ₃	0,3	0,4	0,5	0,4
VVO ₃	0,3	0,6	0,6	0,6
Сумма	10,1	20,8	22,9	24,8

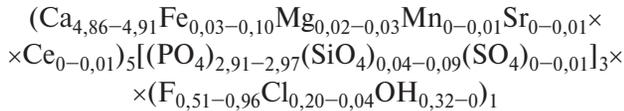
Примечания. Количество FeO и Fe₂O₃ рассчитано по стехиометрии; нпо — ниже предела обнаружения. Ni, Cr — не обнаружены.

Титаномагнетит вулканитов низкой щелочности беден марганцем и цинком. Повышенная концентрация этих элементов характерна для титаномагнетита вулканитов повышенной калийной щелочности [Болдырев и др., 1936; Спиридонов, Дашевская, 1988; Oxide minerals, 1991]. Титаномагнетит описанных дацитов содержит до 4,5% MnO и до 1,7% ZnO. Обогащен Mn и Zn титаномагнетит и иных вулканитов Карадага [Спиридонов и др., 1989].

Титаномагнетит дацитов Карадага нередко в заметной степени замещен гипогенным лепидокрокитом (рис. 2), продуктом регионального низкоградного метаморфизма в условиях цеолитовой фации [Спиридонов и др., 2017]. Это очевидная причина невысокой магнитной восприимчивости рассматриваемых вулканитов.

Ильменит образует относительно редкие вкрапленники овальной формы размером до 0,4×0,2 мм, которые обросли титаномагнетитом (ильменит-I), уплощенные выделения размером до 0,3×0,1 мм в сростании с титаномагнетитом (ильменит-II), а также мелкие и мельчайшие пластинчатые выделения в цементирующей массе (ильменит-III). Все три типа ильменита бедны марганцем (табл. 3). Ильменит-I содержит 1,9 масс.% MgO и 10,1% мишала гематита (ан. 17, табл. 3). Ильменит-II содержит 0,9–1,5 масс.% MgO, 20,8–22,9% мишала гематита (ан. 18, 19, табл. 3). Ильменит-III содержит 0,8 масс.% MgO, 24,8% мишала гематита (ан. 20, табл. 3). Таким образом, ильменит дацитов Карадага содержит до 25 мол.% мишала гематита, что свидетельствует о кристаллизации при повышенной летучести кислорода (fO_2), т.е. о насыщенности расплава водой, что типично для островодужных вулканитов.

Anatum — распространенный аксессуарный минерал дацитов, он составляет до 1% их объема. Большая часть кристаллов апатита образует сростания с вкрапленниками титаномагнетита и ильменита (рис. 2). Нередки и обособленные призматические кристаллы — мелкие вкрапленники апатита в цементирующей массе, их размер до 0,2×0,03 мм. Апатит беден стронцием и лантанидами, содержит заметное количество кремния и железа. Состав апатита отвечает



(ан. 21–28, табл. 4). В составе апатита проявлен отчетливый изоморфизм F и Cl. Для апатита дацитов Карадага характерен тренд с накоплением фтора — от хлор-гидроксил-фторапатита до фторапатита (рис. 3). Такой тренд типичен для апатита большинства магматических горных пород [Болдырев и др., 1936; Бушляков, Холоднов, 1986].

Заключение. Характерная особенность описанных дацитов — крайнее обогащение плагиоклаза анортитовым компонентом, что типично для островодужных вулканитов [Заварицкий, 1955; Волюнец, Колосков, 1976]. Обычно для островодужных дацитов характерен андезин, лабрадор в них редок, тогда как в описанных дацитах Карадага преобладает лабрадор и присутствует немало битовнита. Возможно, это обусловлено повышенной температурой кристаллизации вулканитов Карадага.

Судя по составу авгита вкрапленников, температура их кристаллизации варьировала от ~1050 °С (ядра кристаллов) до ~950 °С (внешние зоны кристаллов); использованы диаграммы Д. Линдсли [Lindsley, 1983].

Ильменит дацитов Карадага содержит до 25 мол.% минала гематита, что свидетельствует о кристаллизации при повышенной fO_2 , т.е. о насыщенности расплава водой, что типично для островодужных вулканитов. Это же зафиксировано в составе сосуществующих титаномагнетита и ильменита. Температура кристаллизации раннего зарождения ассоциирующих титаномагнетита (39,3–38,6% минала ульвошпинели) и ильменита (10,1% минала гематита) — ~900 °С, fO_2 на одну логарифмическую единицу выше буфера QFM. Температура кристаллизации позднего зарождения титаномагнетита (29,9–28,4% минала ульвошпинели) и ильменита (24,8% минала гематита) — ~880 °С, fO_2 на 2 логарифмические единицы выше буфера QFM; использованы диаграммы из работ [Anderson, Lindsley, 1985; Oxide minerals, 1991]. Титаномагнетит дацитов Карадага обогащен марганцем (до 4,5% MnO), ильменит им беден. Вероятно, это обусловлено тем, что при повышенной температуре кристаллизации марга-

Таблица 4

Химический состав (масс.%) апатита островодужных дацитов, Карадаг, Крым

Компоненты	21	22	23	24	25	26	27	28
CaO	53,12	53,73	53,53	54,13	54,07	54,40	53,08	53,91
SrO	0,19	0,22	0,28	нпо	0,18	0,21	0,23	0,19
Ce ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	0,38	0,28	нпо	нпо
FeO	1,25	0,49	0,69	0,70	0,48	0,40	1,46	0,86
MnO	0,19	0,17	0,21	0,14	0,13	0,18	0,15	нпо
MgO	0,17	0,26	0,20	0,21	0,20	0,18	0,19	0,14
P ₂ O ₅	41,01	41,12	40,62	41,42	41,29	40,71	40,90	40,71
SiO ₂	0,45	0,44	0,69	0,43	0,51	1,01	0,62	0,88
SO ₃	нпо	нпо	0,17	нпо	нпо	0,22	нпо	нпо
F	1,88	2,16	2,14	2,39	2,63	2,77	3,26	3,57
Cl	1,21	1,09	1,39	1,05	1,04	0,68	0,85	0,28
Сумма O = F ₂ +Cl ₂	98,41	98,52	98,71	99,22	99,57	99,72	99,10	98,98
Формульные единицы								
Ca	4,862	4,906	4,892	4,910	4,907	4,914	4,847	4,908
Sr	0,009	0,011	0,014	—	0,009	0,010	0,011	0,009
Ce	—	—	—	—	0,012	0,008	—	—
Fe	0,089	0,035	0,049	0,049	0,034	0,028	0,104	0,061
Mn	0,014	0,012	0,015	0,010	0,009	0,013	0,011	—
Mg	0,022	0,033	0,026	0,026	0,025	0,022	0,024	0,018
Сумма	4,996	4,997	4,996	4,995	4,996	4,995	4,997	4,996
PO ₄	2,966	2,966	2,934	2,968	2,961	2,906	2,950	2,929
SiO ₄	0,038	0,037	0,059	0,037	0,043	0,085	0,053	0,075
SO ₄	—	—	0,011	—	—	0,014	—	—
Сумма	3,004	3,003	3,004	3,005	3,004	3,005	3,003	3,004
F	0,508	0,582	0,577	0,640	0,704	0,740	0,878	0,960
Cl	0,175	0,157	0,201	0,151	0,149	0,097	0,122	0,040
ОН	0,317	0,261	0,222	0,209	0,143	0,163	—	—

Примечания. La и другие лантаниды не обнаружены.

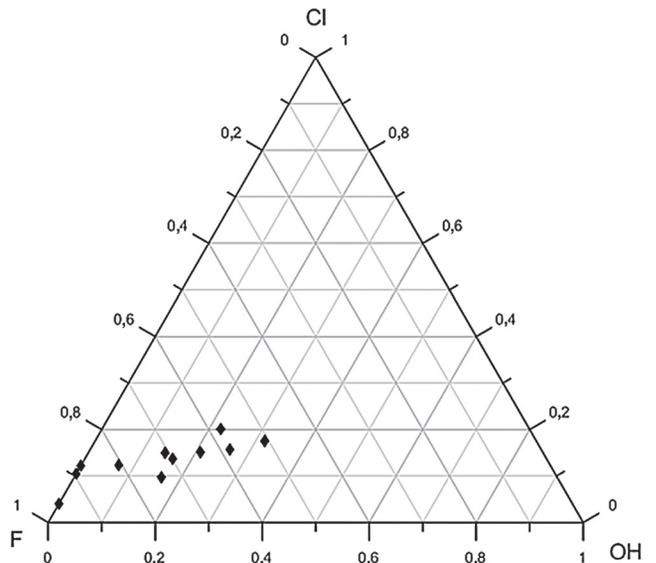


Рис. 3. Диаграмма состава апатита дацитов Карадага в координатах фторапатит–хлорапатит–гидроксилапатит, мол.%

нец перераспределяется в титаномагнетит [Wason, Hirschmann, 1988].

В дацитах Карадага проявлен тренд эволюции апатита со стандартным накоплением фтора — от хлор-гидроксил-фторапатита до фторапатита.

Возможным источником вещества описанных дацитов Карадага могли быть кремнекислые рас-

плавы, возникшие при палингенезе плагиогнейсов амфиболитовой фации фундамента мезозойского Горного Крыма [Спиридонов, 2017, 2018].

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-05-00241, 16-05-00501, 19-05-00490).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев А.К., Годлевский М.Н., Григорьев Д.П.* и др. Курс минералогии. М.; Л.: ОНТИ, 1936. 1156 с.
- Бушляков И.Н., Холоднов В.В.* Галогены в петрогенезе и рудоносности гранитоидов. М.: Наука, 1986. 191 с.
- Вернадский В.И.* О новой магнитной аномалии, найденной в Крыму, и о необходимости ее исследования // Изв. Росс. АН. 1921. С. 102.
- Вольнец О.Н., Колосков А.В.* Плагиоклазы четвертичных эффузивов и малоглубинных интрузивов Камчатки. Новосибирск: Наука, 1976. 135 с.
- Довгаль Ю.М., Радзивилл В.Я., Токовенко В.С.* и др. Вулканы Карадага. Киев: Наукова думка, 1991. 104 с.
- Заварицкий А.Н.* Изверженные горные породы. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 480 с.
- Лагорио 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.
- Лебединский В.И., Макаров Н.Н.* Вулканизм Горного Крыма. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. 207 с.
- Лебединский В.И., Соловьев И.В.* Байосские вулканоструктуры Горного Крыма // Геол. журн. 1988. № 4. С. 85–93.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Эффузивные породы СССР // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1940. № 2. С. 3–31.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю., Дьяконова-Савельева Е.Н.* Вулканическая группа Карадага в Крыму. Л.: Изд-во АН СССР, 1933. 150 с.
- Луцицкий В.И.* Петрография Крыма. Петрография СССР. Сер. 1. Региональная петрография. Вып. 8. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 98 с.
- Милановский Е.Е., Короновский Н.В.* Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии. М.: Наука, 1973. 279 с.
- Милеев С.В., Барабошкин Е.Ю., Розанов С.Б., Рогов М.А.* Положение палеовулкана Карадага в структуре Горного Крыма / Карадаг. История, геология, ботаника, зоология. Кн. 1. Симферополь: Сонат, 2004. С. 68–93.
- Муратов М.В.* Геология Крымского полуострова. М.: Недра, 1973. 192 с.
- Муратов М.В., Архитов И.В., Успенская Е.А.* Стратиграфия, фации и формации юрских отложений Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1960. Т. 35, вып. 1. С. 87–97.
- Никитин М.Ю., Болотов С.Н.* Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 1, 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 135 с.; 2007. 110 с.
- Островская Е.В., Никольская Н.Н., Спиридонов Э.М.* Клинопироксены основных эффузивов восточного склона Южного Урала // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1972. № 3. С. 51–60.
- Попов С.П.* Геологические исследования на Карадаге, Аю-Даге и Чатыр-Даге // Bull. Soc. Imper. Natur. de Moscou. 1899. № 2–3. 114 с.
- Попов С.П.* Минералогия Крыма. М.: Изд-во АН СССР, 1938. 352 с.
- Прозоровский-Голицын А.А.* О горных породах горы Кара-Даг в Крыму // Вестн. естествознания. СПб.: 1891. № 8. С. 228–230.
- Пчелинцев В.Ф.* Заметка о фауне туфобрекчии Карадага (в Крыму) // Докл. АН СССР. 1927. Т. 16. С. 252–256
- Ремизов И.Н.* О среднеюрских отложениях Карадага в Крыму // Зап. геол. отд. Харьков. гос. ун-та имени А.М. Горького. 1962. Т. 15. С. 94–105.
- Рид С.Дж.Б.* Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 с.
- Слудский А.Ф.* Гора Карадаг в Крыму и ее геологическое прошлое // Зап. Крым. об-ва естествоиспытателей и любителей природы. 1911. Т. 1. С. 33–43.
- Спиридонов Э.М.* Островодужные феррокордиерит-альмандиновые плагиориолиты горы Кастель, Горный Крым // Изв. вузов. Геология и разведка. 2017. № 2. С. 15–21.
- Спиридонов Э.М.* О составе фундамента киммерид Горного Крыма // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Т. 2. М.: Геос, 2018. С. 219–223.
- Спиридонов Э.М., Дашевская Д.М.* Хромшпинелиды и ассоциирующие с ними минералы ультраосновных вулканитов Северного Казахстана // Тр. Минерал. музея АН СССР имени А.Е. Ферсмана. 1988. Вып. 35. С. 161–182.
- Спиридонов Э.М., Кортаева Н.Н., Ладыгин В.М.* Хромшпинелиды, титаномагнетит и ильменит островодужных вулканитов Горного Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1989. № 6. С. 37–55.
- Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В., Докучаев А.Я.* Новые данные по геологии Карадагского вулканического массива, Горный Крым // Ломоносовские чтения-2017. М., 2017. URL: https://conf.msu.ru/file/event/4305/eid4305_attach_8a6aa3ce8287b7f3e5afc7f6bf12d7d3e9bebe9b.pdf.
- Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М.* Магматические образования Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1990. Т. 65, вып. 4. С. 119–134; вып. 6. С. 102–112.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А.* Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 317 с.
- Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Кириченко В.А.* и др. Физико-механические свойства кремнекислых вулканогенных пород (Ягоднинский район, южная Камчатка) / Мат-лы 18-й междунар. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 279–283.
- Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н.* О физико-механических свойствах метавулканитов Горного Крыма // Инженерная геология. 2018. Т. 13, № 4. С. 36–51.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.

Чирвинский П.Н. Изверженные горные породы, вулканические брекчии и туфы Кара-Дага в Крыму // Изв. Донского политех. ин-та. Новочеркасск, 1916. Т. 5, № 1. С. 88–138.

Anderson D.J., Lindsley D.H. New (and final!) models for the titanomagnetite-ilmenite geothermometer and oxygen barometer // EOS Transactions. 1985. Vol. 66. 416 p.

Bacon C.R., Hirschmann M.M. Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe — Ti oxides // Amer. Mineral. 1988. Vol. 73. P. 57–61.

Lindsley D.H. Pyroxene thermometry // Amer. Mineral. 1983. Vol. 68. P. 477–493.

Meijers M.J.M., Vrouwe B., Hinsbergen van D.J.J. et al. Jurassic arc volcanism on Crimea: implications for the paleo-subduction zone configuration of the Black Sea region // Lithos. 2010. Vol. 119. P. 412–426.

Oxide minerals / Ed. by D.H. Lindsley // Rev. Mineral. 1991. Vol. 25. 279 p.

Поступила в редакцию 18.02.2019

Поступила с доработки 26.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019