

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ

## ФАЯЛИТ И ФЕРРОГОРТОНОЛИТ ПОСЛЕОСТРОВОДУЖНЫХ ПЛАГИОГРАНИТОВ ГОРЫ КАСТЕЛЬ В КИММЕРИДАХ ГОРНОГО КРЫМА

© 2021 г. поч. чл. Э. М. Спиридонов\*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Воробьевы Горы, 1, Москва ГСП-1, 119991 Россия**\*e-mail: ernstspiridon@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.12.2020 г.

После доработки 14.02.2021 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

Послеостроводужные плагиограниты ( $\text{SiO}_2$  72.02 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O}$  4.57 мас. %,  $\text{K}_2\text{O}$  1.26 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  3.6,  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  92.4 %) куполообразного гипабиссального интрузива горы Кастиль содержат высокожелезистые оливин, ромбический пироксен (эвлит) и биотит (аннит). Охарактеризован состав обнаженной эндоконтактной зоны интрузива. В резко порфириовидных плагиогранитах непосредственного эндоконтакта развит феррогортонолит (Fo 14.5–10.4, MnO 2.32–3.02 мас. %) в сростании с лабрадором–андезином. На большем удалении от контакта плагиограниты содержат феррогортонолит (Fo 10.6) и преобладающий фаялит (Fo 9.6–7.7, MnO 2.66–2.99 мас. %), содержащий до 0.1 мас. % CaO и не содержащий Ni. С ними ассоциирует плагиоклаз, состав которого изменяется от лабрадора и преобладающего андезина до олигоклаза. На еще большем удалении от контакта в составе плагиогранитов преобладает фаялит (Fo 9.3–5.9, MnO 2.90–3.20 мас. %), содержащий до 0.1 мас. % CaO; в его составе Со преобладает над Ni. С этим фаялитом ассоциируют андезин и олигоклаз. Тренд изменения состава циркона коррелирован с трендами изменения составов плагиоклаза и оливина: в породах эндоконтакта циркон содержит 1.17 мас. %  $\text{HfO}_2$  при  $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$  56.6 ( $n = 5$ ); на удалении от контакта – 1.28%  $\text{HfO}_2$  при  $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$  52.5 ( $n = 6$ ); на еще большем удалении – 1.56%  $\text{HfO}_2$  при  $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$  43.2 ( $n = 5$ ). Сделан вывод о том, что в ходе кристаллизационной дифференциации плагиогранитов Кастили произошло накопление Fe и Mn в составе оливина, Na и K в составе плагиоклаза, Hf в составе циркона. Можно предположить, что возникновению высокожелезистого оливина способствовало наличие органического вещества в экзоконтактной зоне интрузива, а сохранность фаялита и феррогортонолита обусловлена гипабиссальными условиями формирования интрузивных пород.

*Ключевые слова:* послеостроводужный кастильский плагиогранитный комплекс, эндемичные плагиограниты с фаялитом и феррогортонолитом, Горный Крым

DOI: 10.31857/S0869605521020118

В Горном Крыму многие десятилетия проводятся студенческие полевые геологические практики. Один из традиционных объектов этих практик – интрузивный массив горы Кастиль, расположенный рядом с Алуштой. Горные породы Кастили изучаются полтора века (Прендель, 1886; Лагорио, 1887; Лучицкий, 1939; Павлинов, 1946; Муратов, 1973; Спиридонов и др., 1990; Милеев и др., 2006; Спиридонов, 2017, и др.). В этих работах горные породы горы Кастиль описаны как биотит-содержащие плагиогранит-порфиры или липаритовые порфиры, или кварцевые порфиры, или плагиограниты. Наблюдения последних лет показали, что это – плагиограниты порфириовидные до

резко порфиризовидных, но не биотитовые, а аннит-фаялитовые, т.е. крайне своеобразные, эндемичные горные породы (Спиридонов, Путинцева, 2019). Статья посвящена главному темноцветному минералу плагиогранитов Кастели – высокожелезистому оливину.

Крайне железистый оливин – фаялит ( $\text{Fe}_{0-10}\text{Fa}_{100-90}$ ) и весьма высокожелезистый оливин – феррогортонолит ( $\text{Fe}_{10-30}\text{Fa}_{90-70}$ ) (Deer et al., 1982) – редкие минералы магматических, высокотемпературных метасоматических (Грачёва, 1966; Золотухин, 1971; Рябов и др., 1985; Спиридонов, 2010, 2012) и метаморфических (Tilley, 1936; Ерёмченко, Ерёмченко, 1972; Ананьев, Ревердатто, 1997; Sokol et al., 2002; Новикова, 2009) пород. Они образуются в восстановительной обстановке, т.к. очень богаты  $\text{Fe}^{2+}$ , нередко – при участии газовой фазы с водородом и/или углеводородами (Иванова и др., 2007 и др.).

Фаялит – характерный минерал высоко железистых внутриплитных гранитоидов и гранитных пегматитов повышенной щелочности (граниты-рапакиви, гранитоидные породы анортозит-мангерит-чарнокит-гранитной серии, граниты анорогенных кольцевых комплексов) и сиенитов; обычно это – докембрийские образования (Заварицкий, 1955; Howard et al., 1956; Маракушев и др., 1966; Stevenson, Hensel, 1978; Deer et al., 1982; Кривдик и др., 1988; Frost et al., 1988, 1999; Janeczek, 1989; Njonfang, Moreau, 2000; Mücke, 2003). Столь же характерен фаялит для кремнекислых щелочных вулканитов, таких как пантеллериты (Заварицкий, 1955; Deer et al., 1982; Civetta et al., 1998). Фаялит развит также в литофизах кремнекислых вулканитов (Deer et al., 1982; Ike et al., 1984). Иной генетический тип представляют феррогортонолит и фаялит магматических пород феррогаббрового и ферродиоритового состава – высокожелезистых дифференциатов “сухих” расслоенных платформенных интрузивов типа Бушвелда, Скэргарда, Аламджаха (Масайтис, 1958; Wager, Brown, 1967). Единственная находка фаялита в субдукционных гранитоидах – гранодиоритах Чили (Vásques et al., 2009) вызывает сомнения, т.к. железистость этих гранодиоритов низкая (74%), что не характерно для фаялит-содержащих магматических пород.

Из приведенных данных видно, аналогов фаялитовым плагиогранитам Кастели – нет.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучена коллекция плагигранитов, собранная в обнаженной части полихронного интрузивного массива горы Кастель, южный берег Горного Крыма. Химический состав плагиогранитов исследован в лабораториях геологического факультета МГУ. Состав минералов определен с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV (лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ). Методика измерений стандартная (Рид, 2008). Фотографии в режиме отраженных электронов и микрозондовые анализы минералов выполнила аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева.

## ИНТРУЗИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ГОРНОГО КРЫМА

А.Е. Лагорио – один из первых петрографов России, изучавших магматические образования Крыма, установил два поколения интрузивных пород в Южном Крыму: более древние габброиды и секущие их гранодиориты с ксенолитами габброидов (Лагорио, 1887). В дальнейшем эти соотношения многократно подтверждались. Ассоциацию габброидов и гранитоидов, среди которых преобладают породы, близкие к плагиогранитам, стали выделять как двухфазную габбро-плагиогранитную формацию (Лучицкий, 1939; Павлинов, 1946; Багдасарян, Лебединский, 1967; Муратов, 1973). Эта схе-

ма используется геологами-тектонистами и поныне (Никишин и др., 2001; Милеев и др., 2006).

Э.М. Спиридонов и Т.О. Фёдоров обособили два петрологически различных интрузивных комплекса – габброидный первомайско-аюдагский и гранитоидный кастельский (Спиридонов и др., 1990). Первый комплекс завершается внедрением послеинтрузивных даек долеритов, второй – внедрением даек плагиогранит-порфиоров. Интрузивные массивы раннебайосского первомайско-аюдагского комплекса пересечены жерловинами и дайками позднебайосской карадагской вулканической серии (Спиридонов и др., 1990). Интрузивные породы первомайско-аюдагского комплекса и вулканиты карадагской серии имеют островодужные петрогеохимические характеристики (Спиридонов и др., 1990; Meijiers et al., 2010). Плагиограниты Кастели пересекают тела вулканитов карадагской серии и содержат их ксенолиты. Возможно, внедрение плагиогранитов кастельского комплекса сопровождало процессы складчатости вулканигов карадагской серии. Галька плагиогранитов, похожих на кастельские, описана в  $J_3$  конгломератах горы Демерджи (Чернов, 1971).

Для интрузивных пород первомайско-аюдагского комплекса типичны анортит, битовнит, ромбический пироксен, хромшпинелиды, армоколлит, Mg-ильменит, цирконолит, баделеит, чевкинит, алланит-(Ce) (Спиридонов и др., 2018, 2019а, 2019б). Для гранитоидов кастельского комплекса типичны обильные циркон, монацит и ксенотим (Спиридонов, Путинцева, 2019). Находка в плагиогранитах Кастели фаялита – еще одно свидетельство кардинального различия двух интрузивных комплексов киммерид Горного Крыма.

**Интрузив плагиогранитов горы Кастель.** Куполовидные интрузивы плагиогранитоидов кастельского комплекса – Кастельский, Шахра, Ай-Йори, Серагоз – развиты в ядерной части глубоко эродированного Южнобережного поднятия Горного Крыма среди мощной сложно дислоцированной толщи флиша таврической серии. Осадочные породы в этом регионе содержат заметное количество рассеянного органического вещества. На контакте ороговикованных осадочных пород с интрузивными породами часто развиты примазки и скопления графита; толщина таких скоплений – до 13 мм.

Куполовидный интрузив горы Кастель размером около  $1 \times 0.5$  км вытянут в меридиональном направлении. С учетом ориентировки первичных трещин отдельности, верхняя часть пологого купола интрузива эродирована незначительно (Павлинов, 1946). Хорошо обнаженный западный контакт интрузива залегает криволинейно круто, почти вертикально, местами с крутым наклоном под интрузив. Интрузивный контакт с ороговикованными осадочными породами и биотитовыми роговиками приверренный; поверхность контакта имеет сложную морфологию.

Складчатая толща флиша пронизана множеством небольших интрузивных тел габброидов первомайско-аюданского комплекса: в кровле купола плагиогранитов, у западного, юго-восточного и северо-восточного его контактов. Там, где удастся наблюдать эти контакты, резко порфиroidные тонко-мелкозернистые плагиограниты срезают габброиды (рис. 1). В отдельных участках юго-восточного склона у подножия горы Кастель плагиограниты контактируют со средне-крупнозернистыми габброидоритами первомайско-аюдагского комплекса, содержат их ксенолиты.

Приконтактовая часть интрузива шириной до 10–15 м сложена тонко-мелкозернистыми резко порфиroidными аннит-феррогортонитовыми плагиогранитами, которые местами трудно отличимы по структуре от плагиогранит-порфиоров секущих их даек; в породах даек железистого оливина нет. Вглубь интрузива зернистость аннит-фаялитовых плагиогранитов постепенно увеличивается до мелко-среднезернистой и среднезернистой.

В плагиогранитах Кастели относительно широко развиты околотрещинные послеинтрузивные гидротермальные метасоматиты – эпидот-хлоритовые пропициты с пи-



**Рис. 1.** Интрузивный контакт мелкозернистых кастельских плагиогранитов (светлые, внизу обнажения) и среднезернистых габбро-норит-долеритов первомайско-аюдагского комплекса. Северо-западный склон горы Кастель.

**Fig.1.** The intrusive contact of fine-grained plagiogranites (light, in the lower part of the outcrop) and medium-grained gabbro-norite-dolerites of the Pervomaysko-Ayu-Dag complex. The north-western side of the Mt. Kastel.

ритом и мусковитовые березиты. В старой каменоломне на южном склоне горы Кастель вскрыта зона березитов ярко-желтого цвета с обильным пиритом.

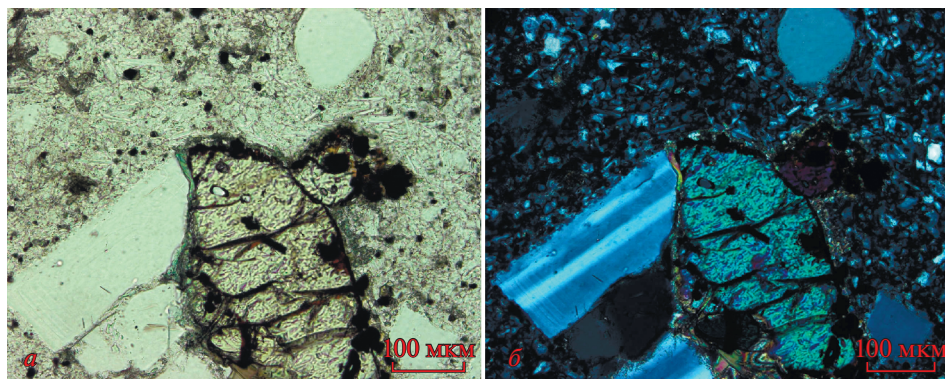
По всем признакам интрузив плагиогранитов горы Кастель формировался в гипабиссальных условиях.

**Состав плагиогранитов.** Минеральный состав плагиогранитных пород горы Кастель относительно устойчив. Более крупные выделения, имеющие в породах эндоконтакта вид вкрапленников, представлены осцилляционно-зональным плагиоклазом, фаялитом и/или феррогортонолитом, кварцем, аннитом. Размер кристаллов плагиоклаза, железистого оливина и аннита изредка достигает 2–3 мм. Состав плагиоклаза в непосредственно эндоконтактовых плагиогранитах (восточная часть южного склона горы) обычно варьирует от низкокалиевого лабрадора  $\text{Ca}_{60,5-50,4}\text{Na}_{39,0-49,0}\text{K}_{0,5-0,6}$  до умеренно калиевого андезин-олигоклаза  $\text{Ca}_{30,5}\text{Na}_{66,5}\text{K}_{3,0}$ . С этим плагиоклазом образует сростания феррогортонолит (рис. 2, табл. 1).

Состав плагиоклаза в плагиогранитах, расположенных на большем удалении от контакта интрузива (центральная часть южного склона горы), обычно варьирует от низкокалиевого лабрадора  $\text{Ca}_{52,2}\text{Na}_{47,1}\text{K}_{0,7}$  до преобладающего андезина  $\text{Ca}_{42,1}\text{Na}_{56,7}\text{K}_{1,2}$  и умеренно калиевого олигоклаза  $\text{Ca}_{24,7}\text{Na}_{71,1}\text{K}_{4,2}$ . С этим плагиоклазом ассоциируют железистый феррогортонолит и преобладающий фаялит (табл. 2).

Состав плагиоклаза в плагиогранитах, еще более удаленных от контакта интрузива (западная часть южного склона горы), обычно варьирует от преобладающего андезина  $\text{Ca}_{41,5}\text{Na}_{57,1}\text{K}_{1,4}$  до умеренно калиевого олигоклаза  $\text{Ca}_{28,2}\text{Na}_{69,0}\text{K}_{2,8}$ . С этим плагиоклазом ассоциирует фаялит (рис. 3, табл. 3).

Таким образом, намечился тренд постепенного изменения состава плагиоклаза (снижение кальциевости и рост калиевости) и рост железистости оливина по направ-



**Рис. 2.** Срастание феррогортонолита и андезина-лабрадора, а также кристалл кварца в мелкозернистой матрице. Плагииграниты восточной части южного склона горы Кастель. Изображения в проходящем свете (*a* – без анализатора, *б* – в скрещенных николях).

**Fig. 2.** Intergrowth of ferrogortonolite and andesine-labradorite as well as the quartz crystal in fine-grained matrix. Plagiogranites of the southern side of the Mt. Kastel. Transmitted light, one polar (*a*), crossed polars (*b*).

лению от эндоконтактовой зоны вглубь интрузива. В целом, преобладающий состав плагиоклаза – андезин. Вокруг кристаллов феррогортонолита и фаялита нередко развиты узкие каймы замещения высокожелезистого ромбического пироксена – эвлита  $\text{Ca}_{1.0-1.8}\text{Mg}_{19.2-27.5}\text{Fe}_{70.7-79.8}$  и более широкие каймы замещения и обрастания высокожелезистого биотита – аннита.

В матрице пород преобладают олигоклаз и кварц, распространены аннит, титаномагнетит, ильменит, ортоклаз, циркон, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), фторапатит, F-

**Таблица 1.** Химический состав феррогортонолита (мас. %). Плагииграниты юго-восточной части южного склона горы Кастель

**Table 1.** Chemical composition of ferrogortonolite (wt %). Plagiogranites of the south-eastern side of the Mt. Kastel

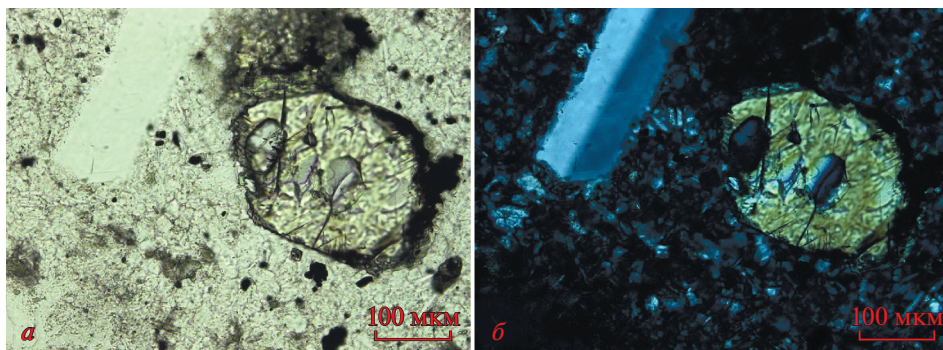
Компоненты	1	2	3	4	5	6
MgO	6.01	5.50	5.22	5.13	5.06	4.21
FeO	60.89	61.13	61.11	60.56	61.61	62.14
MnO	2.41	2.32	2.58	3.02	2.44	2.47
ZnO	нпо	0.13	0.24	0.20	0.23	0.21
SiO <sub>2</sub>	30.96	30.62	30.62	30.47	30.66	30.21
Сумма	100.27	99.70	99.77	99.38	100.00	99.22
Коэффициенты в формуле (O = 4)						
Mg	0.289	0.267	0.254	0.251	0.246	0.207
Fe <sup>2+</sup>	1.645	1.667	1.669	1.661	1.681	1.719
Mn	0.066	0.064	0.071	0.084	0.067	0.069
Zn	–	0.003	0.006	0.005	0.005	0.005
Сумма	2.000	2.001	2.000	2.001	2.000	2.001
Si	1.000	0.999	1.000	0.999	1.000	0.999
Fo, %	14.5	13.4	12.7	12.6	12.3	10.4

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) феррогортонолита (7) и фаялита (8–12). Плагииграниты центральной части южного склона горы Кастель

**Table 2.** Chemical composition (wt %) of ferrohortonolite (7) and fayalite (8–12). Plagiogranites of the central side of the Mt. Kastel

Компоненты	7	8	9	10	11	12
MgO	4.31	3.87	3.75	3.75	3.33	3.08
FeO	61.86	62.16	62.10	62.15	62.71	63.00
MnO	2.66	2.54	2.76	2.91	2.99	2.66
CaO	0.09	0.08	нпо	0.09	нпо	0.09
SiO <sub>2</sub>	30.23	29.96	29.95	30.06	29.95	29.77
Сумма	99.15	98.61	98.56	98.96	98.98	98.60
Коэффициенты в формуле (O = 4)						
Mg	0.212	0.192	0.192	0.186	0.166	0.154
Fe <sup>2+</sup>	1.712	1.734	1.735	1.729	1.750	1.768
Mn	0.074	0.072	0.072	0.082	0.084	0.076
Ca	0.003	0.003	—	0.003	—	0.003
Сумма	2.001	2.001	2.000	2.000	2.000	2.001
Si	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999
Fo, %	10.6	9.6	9.4	9.3	8.3	7.7

содержащий титанит. Циркон содержит 1.09–1.73 мас. % HfO<sub>2</sub>. Тренд изменения состава циркона в плагиигранитах коррелирован с трендами изменения составов плагиоклаза и оливина: в породах непосредственного эндоконтакта циркон содержит 1.17 (1.09–1.32) мас. % HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 56.6 (49–60) (*n* = 5); на удалении от контакта – 1.28 (1.18–1.39) мас. % HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 52.5 (46–59) (*n* = 6); на еще большем удалении от контакта – 1.56 (1.22–1.73) мас. % HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 43.2 (38–54) (*n* = 5).



**Рис. 3.** Кристаллы фаялита (с включениями андезина) и андезина-олигоклаза в мелкозернистой матрице. Плагииграниты западной части южного склона горы Кастель. Изображения в проходящем свете (*a* – без анализатора, *b* – в скрещенных николях).

**Fig.3.** Crystals of fayalite (with andesine inclusions) and andesine-oligoclase in the fine-grained matrix. Plagiogranites of the western side of the Mt. Kastel. Transmitted light, one polar (*a*), crossed polars (*b*).

**Таблица 3.** Химический состав фаялита (мас. %). Плагииграниты центральной части южного склона горы Кастель

**Table 3.** Chemical composition of fayalite (wt %). Plagiogranites of the southern side of the Mt. Kastel

Компоненты	13	14	15	16	17	18
MgO	3.71	3.24	2.97	2.61	2.45	2.36
NiO	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04
FeO	61.42	61.87	62.94	63.53	63.44	63.94
MnO	2.92	3.00	2.90	3.20	3.17	3.16
CoO	0.37	0.45	0.21	0.24	0.29	0.29
CaO	0.07	0.06	0.10	0.04	0.04	0.05
SiO <sub>2</sub>	29.90	29.80	29.92	29.97	29.94	29.72
Сумма	98.46	98.47	99.08	99.55	99.36	98.86
Коэффициенты в формуле (O = 4)						
Mg	0.186	0.162	0.148	0.130	0.122	0.118
Ni	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe <sup>2+</sup>	1.718	1.738	1.759	1.772	1.776	1.781
Mn	0.083	0.085	0.082	0.090	0.090	0.091
Co	0.010	0.012	0.006	0.006	0.008	0.007
Ca	0.002	0.002	0.004	0.001	0.001	0.002
Сумма	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.998
Si	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
Fo, %	9.3	8.1	7.4	6.5	6.1	5.9

Химический состав плагиигранитов Кастельского интрузива довольно устойчив. Средний состав пород (мас. %,  $n = 4$ ): SiO<sub>2</sub> 72.02, TiO<sub>2</sub> 0.14, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.08, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.01, FeO 2.84, MnO 0.10, MgO 0.13, CaO 2.52, Na<sub>2</sub>O 4.57, K<sub>2</sub>O 1.26, ппп 5.12, сумма 99.97%. Это высокожелезистые породы [Fe/(Mg + Fe) 92.7], умеренно низко щелочные, со значительным преобладанием Na над K (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 3.6). С этими характеристиками коррелирует длиннопризматический габитус кристаллов циркона.

### ФАЯЛИТ И ФЕРРОГОРТОНОЛИТ ПЛАГИОГРАНИТОВ ГОРЫ КАСТЕЛЬ

Форма кристаллов феррогортонолита и фаялита типичная для оливина (рис. 2, 3). Размер кристаллов достигает 2 мм, крайне редко – 3 мм, обычно составляет не более 0.5–1 мм. Феррогортонолит преобладает в плагиигранитах непосредственного эндо-контакта (восточная часть южного склона горы Кастель) (табл. 1, ан. 1–6). Его состав: (Fe<sub>1.65–1.72</sub><sup>2+</sup>Mg<sub>0.29–0.21</sub>Mn<sub>0.07–0.08</sub>)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>], Fo 14.5–10.4, в среднем 12.7, MnO 2.32–3.02 мас. %, в среднем 2.54%. Ni и Ca стандартным микронзондовым анализом не обнаружены.

Плагииграниты на большем удалении от контакта интрузива (в центре южного склона горы Кастель) содержат преобладающий фаялит и реже гортонолит (табл. 2). Состав этого оливина отвечает формуле (Fe<sub>1.71–1.77</sub><sup>2+</sup>Mg<sub>0.21–0.15</sub>Mn<sub>0.07–0.08</sub>)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]; Fo 10.6–7.7, в среднем 9.2, MnO 2.66–2.99 мас. %, в среднем 2.75%, минерал содержит до 0.1 мас. % CaO, Ni не обнаружен. В плагиигранитах, расположенных еще далее от контакта интрузива (западная часть южного склона горы), преобладает фаялит (табл. 3, ан. 13–18) с формулой (Fe<sub>1.72–1.78</sub><sup>2+</sup>Mg<sub>0.19–0.12</sub>Mn<sub>0.08–0.09</sub>)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]; Fo 9.3–5.9, в среднем 7.2,

MnO 2.90–3.20 мас. %, в среднем 3.06%, минерал содержит до 0.1 мас. % CaO. Интересно, что кобальт в составе этого фаялита существенно преобладает над никелем.

В целом, преобладающий состав оливина плагиогранитов горы Кабель отвечает фаялиту.

### ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обнаженная часть интрузива горы Кабель сложена послеостроводужными породами плагиогранитного состава. В резко порфириовидных плагиогранитах непосредственного эндоконтакта развит феррогортонолит Fo 14.5–10.4 с 2.32–3.02 мас. % MnO в сростании с низкокалийевым лабрадором – андезином. На большем удалении от контакта плагиограниты содержат феррогортонолит Fo 10.6 и преобладающий фаялит Fo 9.6–7.7 с 2.66–2.99 мас. % MnO; с ними ассоциирует плагиоклаз, изменяющийся по составу от низкокалийевых лабрадора и преобладающего андезина до умереннокалийевого олигоклаза. На еще большем удалении от контакта в составе плагиогранитов преобладает фаялит Fo 9.3–5.9 с 2.90–3.20 мас. % MnO. С этим фаялитом ассоциирует низкокалийевый андезин и калиевый олигоклаз. Тренд изменения состава циркона коррелирован с трендами изменения составов плагиоклаза и оливина: в породах непосредственного эндоконтакта циркон содержит 1.17 мас. % HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 56.6 ( $n = 5$ ); на удалении от контакта – 1.28% HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 52.5 ( $n = 6$ ); на еще большем удалении – 1.56% HfO<sub>2</sub> при ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 43.2 ( $n = 5$ ). В ходе кристаллизационной дифференциации плагиогранитов Кабели произошло накопление Fe и Mn в составе оливина, Na и K в составе плагиоклаза, Hf в составе циркона.

Можно предположить, что возникновению высокожелезистого оливина способствовало наличие органического вещества в экзоконтактовой зоне интрузива, а сохранность фаялита и феррогортонолита обусловлена гипабассальными условиями формирования интрузивных пород.

Столь своеобразные фаялитовые плагиограниты могли возникнуть, вероятно, в условиях орогенного режима, который следует выделить в истории развития мезозоид Горного Крыма.

Химический состав антит-фаялитовых плагиогранитов Кабельского интрузива близок к составу плагиориолитов знаменитой в Крыму дайки альмандин-феррокордиеритовых риолитов (“форелевого камня”), которая расположена у юго-западного подножия горы Кабель. Для этих плагиориолитов предложен механизм формирования материнского расплава при палингенезе высокожелезистых гранат-кордиеритовых плагиогнейсов амфиболитовой фации, которые в данном месте слагают кристаллический фундамент Горного Крыма (Спиридонов, 2017, 2018). Аналогичный механизм приемлем и для высокожелезистых кабельских плагиогранитов.

Автор благодарен Н.Н. Коротаевой за высокое качество фотографий и химических анализов минералов, полученных с помощью электронного микронзонда. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-05-00490) с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета им. М.В. Ломоносова.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ананьев В.А., Ревердатто В.В. Уникальная минеральная ассоциация Fe-апатит – Fe-кордиерит-фаялит на Аю-Даге как результат контактового метаморфизма // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 3. С. 362–364.

Багдасарян Г.П., Лебединский В.И. Новые данные об абсолютном возрасте магматических пород Горного Крыма // Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. С. 149–152.

Грачёва О.С. Фаялитовые и сидерофиллитовые грейзены Верхне-Колымского региона // ЗВМО. 1966. Ч. 95. Вып. 5. С. 583–588.



- Ерёменко Г.К., Ерёменко Е.И.* Метакарбонатные контактовые роговики Аю-Дага // Докл. АН УССР. Сер. Б. **1972**. № 7. С. 585–589.
- Заварицкий А.Н.* Изверженные горные породы. М.: Изд. АН СССР, **1955**. 480 с.
- Золотухин В.В.* О находке фаялитосодержащих метасоматитов в рудах Норильска // Докл. АН СССР. **1971**. Т. 198. С. 692–695.
- Иванова Л.А., Медведев В.Я., Почекунина М.В.* Особенности образования фаялита в восстановленных системах // Докл. РАН. **2007**. Т. 417. № 3. С. 382–384.
- Кривдик С.Г., Орса В.И., Брянский В.П.* Фаялит-геденбергитовые сиениты юго-западной части Корсунь-Новомиргородского плутона // Геологич. журн. **1988**. Т. 6. С. 43–53.
- 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.
- Луцицкий В.И.* Петрография Крыма. В кн.: Петрография СССР. Серия 1. Региональная петрография. Вып. 8. М.-Л.: Изд. АН СССР, **1939**. 98 с.
- Маракушев А.А., Тарарин И.А., Залищак Б.Л.* Минеральные фации гранитоидов и их рудосность. М.: Наука. **1966**. 272 с.
- Масайтис В.Л.* Петрология Аламджахского траппового интрузива. Л.: Госгеолтехиздат. **1958**. 135 с.
- Милеев В.С., Барабошкин Е.Ю., Розанов С.Б., Рогов М.А.* Киммерийская и альпийская тектоника Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Геол. **2006**. Т. 81. Вып. 3. С. 22–33.
- Муратов М.В.* Геология Крымского полуострова. М.: Недра, **1973**. 192 с.
- Никишин А.М., Коротаев М.В., Болотов С.Н., Еришов А.В.* Тектоническая история Черноморского бассейна // Бюлл. МОИП. Геол. **2001**. Т. 76. Вып. 3. С. 3–18.
- Новикова С.А.* Фаялит из железистых паралав древних угольных пожаров Кузбасса // ЗРМО. **2009**. Ч. 138. Вып. 1. С. 91–104.
- Павлинов В.Н.* Форма и механизмы образования малых интрузий типа лакколлитов. М.: Изд. МГРИ, **1946**. 411 с.
- Прендель Р.А.* Кристаллические породы горы Кагель и прилегающей к ней местности // Зап. Новороссийского общества естествознания. Одесса, **1886**. Т. VI. Вып. 1. С. 173–210.
- Рид С.Дж.Б.* Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, **2008**. 232 с.
- Рябов В.В., Павлов А.Л., Лопатин Г.Г.* Самородное железо сибирских траппов. Новосибирск: Наука, **1985**. 169 с.
- Спиридонов Э.М.* Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. **2010**. Т. 51. С. 1356–1378.
- Спиридонов Э.М.* Природный металлургический процесс // Современные проблемы магматизма и метаморфизма. СПб: СПбГУ, **2012**. Т. 2. С. 249–252.
- Спиридонов Э.М.* Островодужные феррокордиерит-альмандиновые плагиориолиты горы Кагель, Горный Крым // Изв. ВУЗов. Геол. развед. **2017**. № 2. С. 15–21.
- Спиридонов Э.М.* О составе фундамента киммерид Горного Крыма // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. М.: Геос, **2018**. Т. II. С. 219–223.
- Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В.* Фаялитовые плагиограниты интрузива горы Кагель, мезозойды Горного Крыма / Ломоносовские чтения – 2019. Москва, 15–25 апреля 2019. М.: МГУ, **2019**.
- Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С., Лысенко В.И., Филимонов С.В., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н.* Армолколлит-содержащие островодужные плагиолецитолиты и оливиновые габбро-нориты Балаклавы, Горный Крым // Вестник МГУ. Сер. геол. **2019а**. № 3. С. 51–60.
- Спиридонов Э.М., Фёдоров Т.О., Ряховский В.М.* Магматические образования Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Геол. **1990**. Т. 65. Вып. 4. С. 119–134. Вып. 6. С. 102–112.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н.* Цирконолит, баделлеит, циркон и торит островодужных анортит-битовнитовых кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // Вестн. МГУ. Геология. **2018**. № 5. С. 71–79.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н.* Чевкинит-(Се) и перрьерит-(Се) островодужных кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // ЗРМО. **2019б**. Ч. 148. Вып. 4. С. 45–63.
- Чернов В.Г.* О составе верхнеюрских конгломератов горы Демерджи в Крыму // Вестн. МГУ. Геология. **1971**. № 2. С. 17–28.

## Fayalite and Ferrohortonolite in Post-Island-Arc Plagiogranites of the Mt. Kastel in Mountain Crimean Cimmerides

E. M. Spiridonov\*

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Post-island-arc plagiogranites (SiO<sub>2</sub> 72.02 wt %, Na<sub>2</sub>O 4.57 wt %, K<sub>2</sub>O 1.26 wt %, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 3.6, Fe/(Fe + Mg) 92.4 %) of the dome-shaped hypabyssal intrusive of the Mt. Kastel contain high ferriferous olivine, rhombic pyroxene (eulite) and biotite (annite). Ferrohortonolite (Fo 14.5–10.4, MnO 2.32–3.02 wt %) in association with low-potassic labrador–andesine is observed in sharply porphyric endocontact plagiogranites. At a distance away from the contact, plagiogranites contain ferrohortonolite (Fo 10.6) and predominant fayalite (Fo 9.6–7.7, MnO 2.66–2.99 wt %); the mineral contains up to 0.1 wt % of CaO, notably, Ni is not found. Plagioclase which composition varies from low potassic labrador and predominant andesine – to moderately potassic oligoclase associates with them. At a distance further from the contact, fayalite (Fo 9.3–5.9, MnO 2.90–3.20 wt %) is predominate as a component of plagiogranites; the mineral contains up to 0.1 wt % of CaO, whereby Co prevails over Ni. Low potassic andesine – potassic oligoclase associates with this fayalite. The evolutionary trend of zircon composition is correlated with the same trends of plagioclase and olivine. Specifically, zircon contains 1.17 wt % of HfO<sub>2</sub> with ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 56.6 (*n* = 5) within endocontact rocks, 1.28 wt % of HfO<sub>2</sub> with ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 52.5 (*n* = 6) at a distance away from the contact, and 1.56 wt % of HfO<sub>2</sub> with ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 43.2 (*n* = 5) at a distance further from the contact. Consequently, there was an accumulation of Fe and Mn in olivine composition, Na and K in plagioclase composition and Hf in zircon composition during the crystallization differentiation of plagiogranites of the Mt. Kastel. Apparently, the emergence of high ferriferous olivine was facilitated by the presence of graphite in the contact zone of the intrusive; the preservation of fayalite and ferrohortonolite is contingent on hypabyssal intrusive rocks conditions.

*Keywords:* post-island-arc Kastel plagiogranite complex, plagiogranite with fayalite and ferrohortonolite, Mountain Crimea

### REFERENCES

- Ananief V.A., Reverdatto V.V. Unique mineralization of Fe-apatite – Fe-cordierite – fayalite in Au-Dag as a result of contact metamorphism. *Dokl. Earth Sci.* **1997**. Vol. 353(3). P. 362–364.
- Bagdasaryan G.P., Lebedevsky V.I. New data on absolute age of magmatic rocks in Mountain Crimea. *Dokl. Acad. Sci. USSR.* **1967**. Vol. 173. P. 149–152.
- Chernov V.G. About compositions of Upper Jurassic conglomerates of the Mt. Demerdj in Crimea. *Vestnik MSU. Geol.* **1971**. N 2. P. 17–28 (in Russian).
- Civetta L., D'Antonio M., Orsi G., Tilton G.R. The geochemistry of volcanic rocks from Pantelleria Island, Sicily Channel: petrogenesis and characteristics of the mantle source region. *J. Petrol.* **1998**. Vol. 39(8). P. 1453–1491.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Rock-forming minerals. Vol. IA. Orthosilicates. London: Longman, Green and Co., **1982**. 597 p.
- Eremenko G.K., Eremenko E.I. Metacarbonate hornfels in the Au-Dag intrusive. *Dokl. Acad. Sci. UkrSSR. Ser. B.* **1972**. N 7. P. 585–589 (in Russian).
- Gracheva O.S. Fayalitic and siderophillic greisens from the Upper-Kolyma region. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1966**. Vol. 95(5). P. 583–588 (in Russian).
- Frost C.D., Frost B.R., Chamberlain K.R., Edwards B.R. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *J. Petrol.* **1999**. Vol. 40(12). P. 1771–1802.
- Frost C.D., Lindsley D.H., Andersen D.J. Fe-Ti oxide – silicate equilibria: Assemblages with fayalitic olivine. *Amer. Miner.* **1988**. Vol. 73. P. 727–740.
- Howard W.J., Howard T.E., Chapman J.W., Chapman R.W. Occurrence and age of chevkinite from the Devil's slide fayalite – quartz sienite near Stark, New Hampshire. *Amer. Miner.* **1956**. Vol. 41. P. 474–487.

Ike E.C., Bowden P., Martin R.F. Fayalite and clinopyroxene in the porphyries of the Tibchi anorogenic ring-complex, Nigeria: postmagmatic initiation of a peralkaline trend. *Canad. Miner.* **1984**. Vol. 22. P. 401–409.

Ivanova L.A., Medvedev V.Ya., Pochekunina M.V. Specific of formation of fayalite under reduction conditions. *Doct. Earth Sci.* **2007**. Vol. 417(3). P. 382–384 (in Russian).

Janeczek J. Manganoan fayalite and products of its alteration from the Strzegom Pegmatites, Poland. *Miner. Mag.* **1989**. Vol. 53. N 371. P. 315–325.

Krivdik S.G., Orsa V.I., Bryansky V.P. Fayalite-hedenbergite syenites of the southeastern part of the Korsun-Novomirgorod pluton. *Geol. J.* **1988**. Vol. 6. P. 43–53 (in Russian).

Lagorio A.E. About any massive rocks from Crimea and its geological significance. *Proc. Warszaw. Univer.* 1887. N 5. P. 1–16. N 6. P. 17–48 (in Russian).

Luchitsky V.I. Petrography of Crimea. In: *Petrography of USSR. Ser. 1. Regional petrography*. Vol. 8. Moscow, Leningrad: Acad. Sci. USSR, **1939**. 98 p. (in Russian).

Marakushev A.A., Tararin I.A., Zalishchak B.L. Mineral facies of granitoids and its ore potential. Moscow: Nauka, **1966**. 272 p. (in Russian).

Masaytis V.L. Petrology of the Alamdjakh trap intrusive. Leningrad: Gosgeoltechizdat, **1958**. 135 c. (in Russian).

Meijers M.J.M., Vrouwe B., van Hinsbergen D.J.J., Kuiper K.F., Wijbrans J., Davies G.R., Stephenson R.A., Kaymakci N., Matenco L., Saintot A. Jurassic arc volcanism in Crimea (Ukraine): implications for the paleo-subduction zone configuration of the Black Sea region. *Lithos*. **2010**. Vol. 119. P. 412–426.

Mileev V.S., Baraboshkin E.Yu., Rosanov S.B., Rogov M.A. Cimmerian and Alpine tectonic of Mountain Crimea. *Bull. MOIP. Geol.* **2006**. Vol. 81. N 3. P. 22–33 (in Russian).

Mücke A. Fayalite, pyroxene, amphibole, annite and their decay products in mafic clots within the Younger Granites of Nigeria: Petrography, mineral chemistry and genetic implications. *J. African Earth Sci.* **2003**. Vol. 36. P. 55–71.

Muratov M.V. Geology of the Crimea peninsula. Moscow: Nedra, **1973**. 192 p. (in Russian).

Nikishin A.M., Korotaev M.V., Bolotov S.N., Ershov A.V. Tectonic history of the Black Sea basin. *Bull. MOIP. Geol.* **2001**. Vol. 76 (3). P. 3–18 (in Russian).

Njonfang E., Moreau C. The mafic mineralogy of the Pandé massif, Tikar plain, Cameroon: implications for a peralkaline affinity and emplacement from highly evolved alkali magma. *Miner. Mag.* **2000**. Vol. 64(3). P. 525–537.

Novikova S.A. Fayalite from Fe-rich paralavas of ancient coal fires in Kuzbass, Russia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. Vol. 138. N 1. P. 91–104 (in Russian).

Pavlinov V.N. Forms and mechanism formation of the small intrusives at type laccoliths. Moscow: Russian State University for Geological Prospecting, **1946**. 411 p. (in Russian).

Prenzel R.A. Crystalline rocks of the Mt. Kastel and the surrounding area. *Proc. Novorossyiskogo Soc. Natural Sci. Odessa*, **1886**. Vol. VI. Vol. 1. P. 173–210 (in Russian).

Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. Cambridge University Press, **2005**.

Ryabov V.V., Pavlov A.L., Lopatin G.G. Native iron from Siberian trapps. Novosibirsk: Nauka, **1985**. 169 p. (in Russian).

Sokol E., Sharygin V., Kalugin V., Volkova N., Nigmatulina E. Fayalite and kirschsteinite solid solutions in melts from burned spoil-heaps, South Urals, Russia. *Eur. J. Miner.* **2002**. Vol. 14. P. 795–807.

Spiridonov E.M. Ore-magmatic systems of the Norilsk ore field. *Russian Geol. Geophys.* **2010**. Vol. 51. P. 1356–1378 (in Russian).

Spiridonov E.M. The natural metallurgical process. In: *Modern problems of magmatism and metamorphism*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, **2012**. Vol. 2. P. 249–252 (in Russian).

Spiridonov E.M. Island arc ferrocordierite-almandine plagioclites at the Mt. Kastel, Mountain Crimea. *Proc. Univers. Geol. Prospect.* **2017**. N 2. P. 15–21 (in Russian).

Spiridonov E.M. About the composition of basement Cimmerides in Mountain Crimea. In: *Problems of tectonic and geodynamic of Earth core and mantle*. Moscow: Geos, **2018**. Vol. II. P. 219–223 (in Russian).

Spiridonov E.M., Fedorov T.O., Ryakhovskiy V.M. Magmatism of Mountain Crimea. *Bull. MOIP. Geol.* **1990**. Vol. 65. N 4. P. 119–134. N 6. P. 102–112 (in Russian).

Spiridonov E.M., Filimonov S.V., Semikolennykh E.S., Korotaeva N.N., Krivitskaya N.N. Zirconolite, baddeleyite, zircon, and thorite in island-arc anorthite-bytownite quartz gabbro-norite-dolerites of the Ayu-Dag intrusive, Mountain Crimea. *Moscow Univers. Geol. Bull.* **2018**. Vol. 73. N 6. P. 538–545 (in Russian).

Spiridonov E.M., Filimonov S.V., Semikolennykh E.S., Korotaeva N.N., Krivitskaya N.N. Chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce) in the island-arc gabbro-norite-dolerites of the Ayu-Dag intrusive, Rocky Crimea. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019b**. Vol. 148. N 4. P. 45–63 (in Russian).

Spiridonov E.M., Putintseva E.V. Fayalite plagiogranites of the Kastel intrusive, Mezozoids of Mountain Crimea. Lomonosov conference – 2019. Moscow, April 15–25, 2019. Moscow: Moscow State University, **2019** (in Russian).

*Spiridonov E.M., Semikolennykh E.S., Lysenko V.I., Filimonov S.V., Korotaeva N.N., Krivitskaya N.N.* Armolkolite-containing island-arc plagiolerhzolites and olivine gabbro-norites in Balaklava, Mountain Crimea. *Moscow Univers. Geol. Bull.* **2019a**. Vol. 74. N 3. P. 51–60 (*in Russian*).

*Stevenson N.C.N., Hensel H.D.* A Precambrian fayalite granite from the south cost of Western Australia. *Lithos.* **1978**. Vol. 11. P. 209–218.

*Tilley C.E.* Eulysites and related rock types from Loch Duich, Ross-shire. *Miner. Mag.* **1936**. Vol. 24. P. 331–342.

*Vásquez P., Glodny J., Franz G., Romer R., Gerdes A.* Origin of fayalite granitoids: New insights from the Cobquecura Pluton, Chile, and its metapelitic xenoliths. *Lithos.* **2009**. Vol. 110. P. 181–198.

*Wager L.R., Brown G.M.* Layered Igneous Complexes. Edinburg: Oliver & Boyd, **1967**. 587 p.

*Zavaritsky A.N.* Igneous rocks. Moscow: Acad. Sci. USSR, **1955**. 480 p. (*in Russian*).

*Zolotukhin V.V.* Fayalite-bearing metasomatites in Norilsk ores. *Dokl. Acad. Sci. USSR.* **1971**. Vol. 198. P. 692–695 (*in Russian*).