

УДК 551.214

НЕОБЫЧНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В АНДЕЗИБАЗАЛЬТЕ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА ЭСМЕРАЛЬДА (МАРИАНСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

© 2024 г. В. А. Рашидов^{а, *}, В. В. Петрова^{б, **}, В. В. Ананьев^а, Н. В. Горькова^б

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^бГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

*e-mail: rashidva@ksnet.ru

**e-mail: v.petrova.v@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2023 г.

После доработки 17.01.2024 г.

Принята к публикации 15.02.2024 г.

Приведены результаты исследований минерального состава андезибазальта, имеющего заполненные вторичными минеральными новообразованиями крупные газовые пустоты и секущую трещину драгированного на подводном вулкане Эсмеральда. Детальное сравнительное изучение минерального состава вещества, выполняющего трещину, околотрещинного пространства и незатронутой вторичными изменениями части андезибазальта позволило впервые для подводного вулкана Эсмеральда установить присутствие ассоциации минералов, не характерных для измененных вулканических пород. Во внутритрещинном пространстве и прилегающих зонах андезибазальта определены широкие диапазоны состава плагиоклаза, исследован изоморфизм в ряду Fe-Са-пироксенов, изучены оксиды, гидроксиды и фторгидроксиды редкоземельных элементов, показана изменчивость в составе минералов ряда магнетит–гематит. Предполагается, что тектонические подвижки привели к возникновению в образовавшихся ранее андезибазальтах проницаемых зон, по которым просочились новые порции расплава. В ограниченном пространстве высокие газонасыщенность флюида, температура и давление обусловили возможность экстракции из расплава и вмещающих пород соединений металлов.

Ключевые слова: подводный вулкан Эсмеральда, андезибазальт, геденбергит, минералы редкоземельных элементов, вулканические газы

DOI: 10.31857/S0024497X24040051, EDN: ZOCPRK

Действующий подводный вулкан Эсмеральда расположен в южной части Марианской островной дуги и поднимается с глубин 1500–2000 м (рис. 1). Диаметр основания вулкана по изобате 1500 м ~22 км. Минимальная глубина, отмеченная на вершине вулкана, изменяется в диапазоне 30–43 м [Горшков и др., 1980; Stern, Bibee, 1980]. На вершине вулкана расположен кратер глубиной 200–300 м и диаметром 2–3.5 км, открытый в западном направлении. На северо-восточной кромке кратера на глубинах около 100 м с помощью эхолотов обнаружены фумаролы [Горшков и др., 1980].

Постройка подводного вулкана Эсмеральда неоднократно драгировалась отечественными и иностранными учеными [Горшков и др., 1980; Stern, Bibee, 1980; Wang et al., 2021]. Детально

петрографо-минералогический состав пород описан в работах [Горшков и др., 1980; Stern et al., 1989; Ананьев и др., 2023а, 2023б, 2024].

В двух рейсах НИС “Вулканолог” в 1978 г. на вулкане Эсмеральда проведено 42 драгирования, в результате которых была собрана коллекция горных пород, слагающих вулканическую постройку. Изучением этой коллекции для проведения сравнительного анализа островодужных подводных вулканов Тихого океана последнее время занимаются авторы настоящей работы.

При драгировании южной стороны гребня активного кратера подводного вулкана Эсмеральда в глубинном интервале 190–150 м (координаты отбора 14°57.6' с.ш. и 145°14.37') (см. рис. 1)

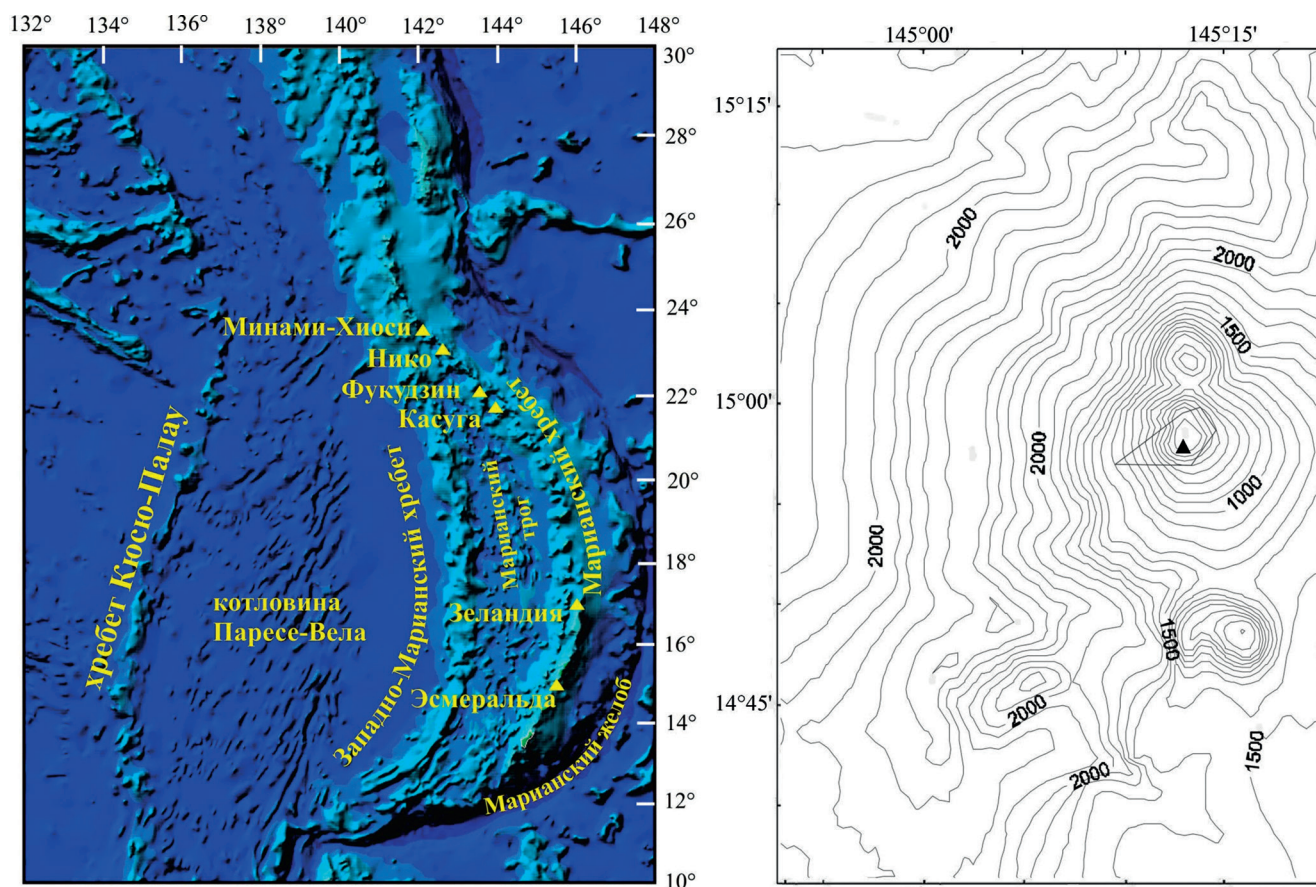


Рис. 1. Местоположение (слева) и батиметрическая карта (справа) подводного вулкана Эсмеральда. Многоугольником обозначена область драгирования, а треугольником – местоположение отбора обр. B5–6–90ТР.

среди поднятого каменного материала присутствовал большой образец андезибазальта (обр. B5–6–90ТР). Этот образец привлек наше внимание тем, что имеет заполненные вторичными минеральными новообразованиями крупные газовые пустоты и секущую трещину (рис. 2). При камеральной обработке в трещинном пространстве и пустотах образца, помимо обычных низкотемпературных минералов (карбонатов, смектитов, минеральных разновидностей кремнезема) и диатомовых водорослей, характерных для небольших глубин, определены высокотемпературные Fe-Mg-пироксены и, главное, минералы редкоземельных элементов (РЗЭ). Именно последняя находка послужила поводом для более тщательного изучения минерального состава данного образца. Полученные результаты составляют основу настоящей статьи.

Ранее авторами [Ананьев и др., 2023а, 2023б, 2024] представлены новые данные о петрографическом и петрохимическом составах широкого диапазона лав, слагающих подводный вулкан



Рис. 2. Спил обр. B5–6–90ТР. Хорошо видны трещина и выполненные минералами пустоты.

Эсмеральда. Задачей настоящей статьи является изучение генезиса и минералогии встреченной в андезибазальтах необычной ассоциации,

включающей уникальные минеральные ассоциации, формирование которых связано с температурами в диапазоне 400–1200°C и высокими давлениями.

Следует заметить, что, несмотря на то, что состав и строение вулкана изучаются на протяжении 75 лет, сведения о РЗЭ в его породах эпизодичны и приведены лишь в шести работах [Колосков и др., 2020; Stern, Bibee, 1980, 1984; Stern et al., 1989; Pearce et al., 2005; Wang et al., 2021]. Ни в одной из этих цитируемых работ присутствие вторичной редкоземельной минерализации не упоминается.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение содержаний РЗЭ выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Геологическом институте (ГИН) РАН по методике, описанной в работе [Fedyunina et al., 2012], аналитик О.И. Окина.

Изучение морфологии и химического состава микрообъектов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega-3 с микрозондовой приставкой Aztec (Чехия, г. Брно). Детектор приставки снабжен майларовым входным окошком, толщиной 0.5 мкм, что позволяло в список определяемых элементов включить углерод и кислород. Структура образцов изучалась при анодном напряжении 30 кВ, ток пучка 50 мкА, химический состав при напряжении 20 кВ. Локальность анализа около 1 мкм. Погрешность химического анализа лежит в рамках 3-й категории точности по требованиям Научного Совета по аналитическим методам. В оксидной форме это записывается как $\Delta C = 0.12 \cdot C^{0.5}$, где C – содержание оксида в весовых процентах, ΔC – абсолютная погрешность. Объектом электронно-микроскопических исследований служили непокрытые полированные шлифы, сцементированные органическим материалом и напыленные золотом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав пород

По петрохимическим характеристикам драгированные на вулкане Эсмеральда лавы, по нашему мнению, соответствуют породам островодужной толеитовой высокожелезистой серии (IAB, IAT), хотя по микроэлементам, они возможно ближе к образованиям известково-щелочной серии островных дуг. По соотношению щелочей

и кремнезема практически все анализы базальтов и андезибазальтов попадают в область пород нормальной щелочности. В единичных случаях встречаются щелочные базальты (обр. В4–1) и низкощелочные дациты (обр. В4–3/1) (табл. 1).

Состав удаленной от трещины слабоизмененной части образца В5–6–90ТР (см. рис. 2), являющегося объектом изучения в настоящей статье, отвечает андезибазальту. Порода крупнопорфировая. Структура основной массы долеритовая. Вкрапленники плагиоклаза представлены одиночными кристаллами размером от 0.8 до 1.5 мм и их гломеропорфировыми сростками размером до 3 мм. Отношение вкрапленники/основная масса = 1/10. Микролиты плагиоклаза (от 0.2 до 0.6 мм) распределены в основной массе беспорядочно. Пироксен в виде мелких плохо окристаллизованных кристаллов заполняет промежутки между кристаллами плагиоклаза. Микролиты рудного минерала занимают аналогичное положение. В основной массе количество пироксена, плагиоклаза и рудного примерно равное. Вблизи трещины количество рудного минерала увеличивается.

Строение трещинного пространства

Визуально в трещинном пространстве и вблизи него можно выделить несколько тесно переплетенных между собой разноцветных зон (рис. 3а). Для приблизительной оценки их минерального состава проведен рентгеноструктурный анализ порошка породы из краевой (светлой) и центральной (темной) зон трещины, который показал, что в образцах присутствуют смектит (в основном в темной зоне), ассоциация разновидностей кремнезема (кристобалит, тридимит) и меньше плагиоклаз, пироксен, карбонат. В результате последующего тщательного анализа минерального строения трещины сделан вывод о том, что присутствие тридимита и кристобалита объясняется наличием в трещинном пространстве, особенно в раздувах, относительно мелководных диатомовых водорослей.

Увеличения сканирующего электронного микроскопа и микрозондовый химический анализ, проведенный по площади отдельных зон, позволяют определить минеральный состав более подробно (см. рис. 3б). Выделено 8 основных зон, заполняющих трещину линейно, субпараллельно ее границам, из которых зоны I и VI прилегают с обеих сторон к вмещающей породе, частично замещая последнюю. Зона III выполняет центральную часть свободного

Таблица 1. Содержание породообразующих (мас. %) и редких (мг/г) элементов в породах подводного вулкана Эсмеральда

Порода	Щелочной базальт	Базальт	Андезибазальт	Дацит	Андезибазальт
№ образца	В4—1	Среднее содержание			В5—6—90ТР*
Породообразующие элементы					
Количество анализов	1	9	6	1	1
SiO ₂	46.61	50.35	53.78	62.99	55.03
TiO ₂	2.31	1.03	1.15	0.43	1.21
Al ₂ O ₃	15.49	17.74	14.58	16.22	13.69
Fe ₂ O ₃	0.17	2.63	2.27	2.30	5.71
FeO	12.18	8.80	10.40	3.90	6.99
MnO	0.17	0.19	0.25	0.10	0.13
MgO	6.66	3.23	2.91	1.94	6.21
CaO	6.85	10.74	8.67	6.45	6.30
Na ₂ O	4.52	2.83	3.22	2.99	3.83
K ₂ O	2.75	0.77	1.24	1.03	0.25
P ₂ O ₅	0.59	0.19	0.27	0.21	0.22
ППП	1.36	0.92	0.97	0.74	0.40
Сумма	99.66	—	—	—	99.97
CO ₂	—	—	—	—	<0.20
H ₂ O	—	—	—	—	0.37
Редкие и рассеянные элементы					
Количество анализов	Среднее содержание				
	1	7	3	1	1
Sc	17	39	37	25	39
V	159	454	267	230	466
Cr	291	43	20	50	11.9
Co	40	60	27	21	34
Ni	223	14	13	8	5.4
Cu	44	251	262	180	280
Zn	118	106	113	62	25
Ga	18	16	15	13	16.9
Rb	76	14	18	27	2.2
Sr	822	380	387	650	322
Ba	743	255	441	250	180
Y	28	27	40	18	27
Zr	262	74	101	56	90
Nb	66.0	1	2	0	2.1

Примечание. *Образец В5–6–90ТР – андезибазальт вне трещинного пространства. Прочерк – элемент не определялся. Здесь и в остальных таблицах приведены данные авторов.

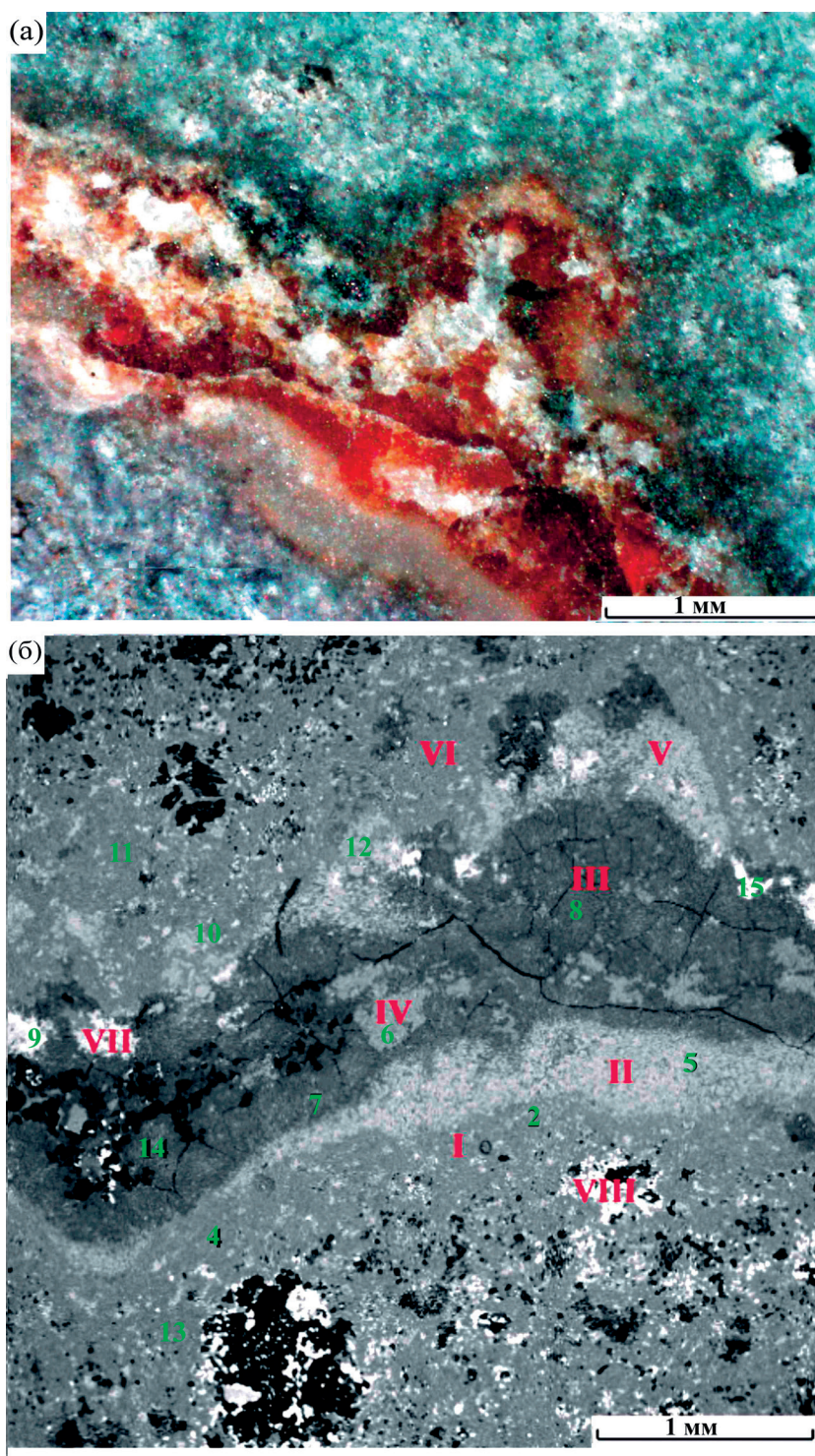


Рис. 3. Строение внутритрещинного пространства и прилегающей к нему части андезибазальта. а – оптический микроскоп, отраженный свет; б – СЭМ.

Римскими цифрами показаны минеральные зоны, арабскими – места химических анализов (площадное сканирование СЭМ) (результаты анализов см. табл. 2).

пространства, а зоны II и V занимают промежуточное положение соответственно с обеих сторон. Зоны IV и VII спорадически присутствуют преимущественно в центральной части

трещины. Зона VIII проявлена точечно и представляет собой заполнение относительно мелких газовых пустот, расположенных в зоне трещины с обеих ее сторон.

Таблица 2. Валовый химический состав пород, выполняющих около трещинное и внутри трещинное пространства (см. рис. 3), мас. %

№ образца	В5–6–90ГР													
Местоположение зоны	южная (на фото) часть образца				заполнение центральной части трещинного пространства				северная (на фото) часть образца			нет привязки к определенным позициям		
	измененная порода				минеральные новообразования				измененная порода			новообразования		
Зона	I (серая)		II (светлая)		III (темная)				IV (светлая)	V (светлая)	VI (серая)		VII (белая)	
Анализ №	2	4	13	5	7	14	8	6	12	10	11	9	15	
SiO ₂	60.73	70.07	50.33	54.4	69.44	57.25	55.99	6.36	57.57	66.1	60.51	43.82	30.5	
TiO ₂	1.57	—	2.53	2.27	—	—	—	—	0.34	0.7	0.38	2.13	0.55	
Al ₂ O ₃	22.3	19.89	16.64	1.95	3.51	3.67	—	—	7.53	22.04	28.75	3.83	3.11	
ΣFeO + Fe ₂ O ₃	1.52	0.98	1.24	—	2.61	1.71	3.25	0.22	4.4	4.53	2.59	23.95	29.61	
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	0.13	
MgO	1.05	—	—	4.11	22.48	22.73	30.12	4.4	6.18	3.4	1.5	13.09	14.11	
CaO	10.69	6.91	8.05	36.94	3.84	1.25	0.48	53.51	27.66	13.86	11.79	9.89	2.46	
Na ₂ O	4.4	4.5	3.73	0.77	1.53	1.65	0.64	0.36	1.89	4.98	5.27	1.09	0.92	
K ₂ O	0.23	0.29	0.21	—	0.21	0.13	0.15	—	—	0.31	0.29	0.09	0.08	
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	4.55	—	—	—	—	
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.6	—	—	
Mo ₂ O ₃	—	—	—	1.1	—	—	—	—	—	—	1.1	—	—	
Sc ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	0.42	—	—	—	—	—	
La ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	0.79	—	—	—	—	
CeO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	0.63	—	—	—	—	
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.37	—	—	
Os	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.11	—	—	
V ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	0.53	

Примечание. Анализы сделаны по площади соответствующих зон (СЭМ) (см. рис. 3).

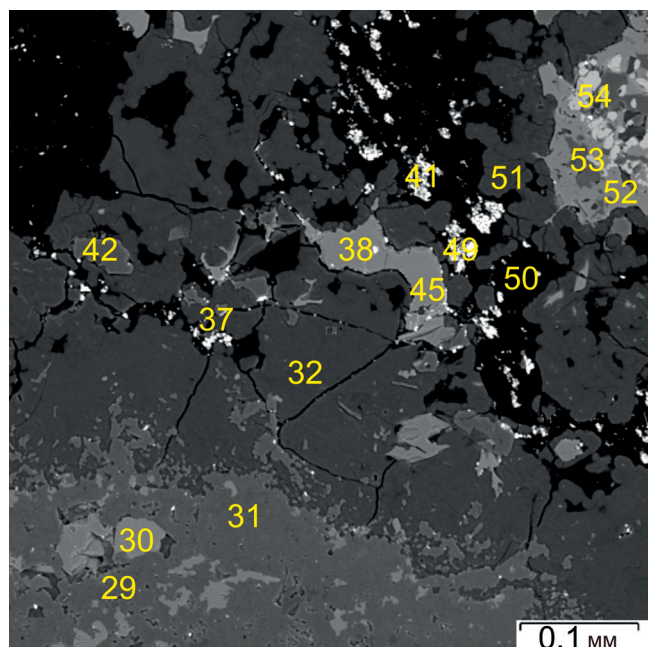


Рис. 4. Строение и минеральный состав внутренней зоны трещинного пространства.

Здесь и далее номера на снимках соответствуют номерам анализов в табл. 3–6.

Минералы, заполняющие внутритрещинное пространство при его пересечении — плагиоклаз: № 29 — (лабрадор 54), № 31 — (андезин 41) № 42 — (андезин 38), 53 — (андезин 41); пироксен: № 30, 38, 43, 45, 46, 52 — геденбергит; сапонит № — 32, 47, 50, 51; гидроксиды редких земель — № , 40, 41; гематит — № 54.

Химический состав выделенных минеральных зон приведен в табл. 2. В первую очередь можно отметить широкие колебания в количестве всех элементов, как по всем зонам, так и в каждой конкретной зоне. В зонах преобразованной породы (I и VI), наиболее удаленных от трещины, значения SiO_2 находятся в пределах от 50 до 70 мас. % и в большей части анализов это выше содержания SiO_2 в неизмененном андезибазальте, в которых $\text{SiO}_2 = \sim 55$ мас. % (см. табл. 1). Значительно повышается количество Al_2O_3 и Na_2O , резко падает K_2O . Зоны II и V следующие далее в сторону центра трещины обогащены кальцием, но максимальное количество кальция наблюдается в зоне IV, точечно присутствующей в центре трещины и в раздувах газовых полостей. Аналогичное положение занимают зоны, обогащенные железом. Относительно мощная центральная трещинная зона III характеризуется высоким присутствием магния. Рентгеноструктурный анализ вещества этой зоны показывает, что его значительную часть составляет смектит.

Детальное исследование минерализации, развитой в узком трещинном пространстве и в его апикальных частях, показывает гораздо более

сложный состав (рис. 4). В апикальной части породы, на границе порода—трещина основным породообразующим минералом является плагиоклаз (см. рис. 4, точки 29, 31). Между кристаллами плагиоклаза расположены ксеноморфные выделения пироксена (см. рис. 4, точка 30) и мелкие кристаллы магнетита.

Внутри трещинного пространства плагиоклаз также присутствует, он спорадически распределен внутри трещины, его кристаллы гораздо мельче и их состав понижается до андезина разных номеров (см. рис. 4, точки 42, 53). Микролиты плагиоклаза выглядят как небольшие ксеноморфные выделения темно-серого цвета. Внутри трещинного пространства пироксена значительно больше, чем плагиоклаза, его выделения крупнее (см. рис. 4, точки 38, 45, 52). В тесной ассоциации с пироксеном находится гематит (см. рис. 4, точка 54). Главным новообразованием во внутритрещинном пространстве является смектит (см. рис. 4, точки 32, 37, 51). В небольшом количестве в ассоциации со смектитом присутствуют карбонат кальция, минералы кремнезема, и сульфид железа (пирит). Но самым интересными является то, что в краевых зонах и центральных частях газовых пустот и самой трещины присутствует оксид РЗЭ (ярко-белые комковатые выделения и точечные кристаллы (см. рис. 4, точки 40, 41)).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что суммарно около- и внутритрещинное пространство заполняют контрастные тесно переплетенные минеральные ассоциации, для формирования которых необходимы разные физико-химические параметры. Для того, чтобы определить эти параметры, необходимо детально рассмотреть свойства всех входящих в ассоциации минералов.

Породообразующие и новообразованные минералы

Плагиоклаз. В исходном андезибазальте единственный минерал вкрапленников — плагиоклаз, представленный одиночными кристаллами и их гломеропорфировыми сростками. Размер одиночных кристаллов от 0.8 до 1.5 мм, сростков до 3 мм. В основной массе породы количество плагиоклаза, пироксена и магнетита примерно равное. Размер микролитов плагиоклаза от 0.2 до 0.6 мм. В гломеропорфировых сростках состав плагиоклаза может достигать лабрадора 67, 68, тогда как наиболее распространены одиночные вкрапленники, состав которых колеблется

Таблица 3. Химический состав плагиоклаза образца В5-6-90ТР (мас. %)

Локализация кристалла	Андезибазальт, микролиты на контакте с трещиной				Внутрикристичное пространство, ассоциация							Андезибазальт
					с сапонитом	с пироксеном, гематитом, сапонитом			с сапонитом, РЗЭ			
Анализ №	1	11	22		42	53	75	89	133	143	156	
SiO ₂	52.20	56.25	54.32		57.64	47.54	60.53	57.04	43.69	50.32	50.17	
TiO ₂											0.38	
Al ₂ O ₃	27.38	25.64	28.10		23.22	28.42	22.58	25.47	19.86	30.73	27.51	
ΣFeO + Fe ₂ O ₃	1.03	1.60	1.15		1.54	1.71	2.66	1.48	2.75	1.21	0.86	
CaO	10.90	9.42	11.31		7.86	7.53	14.79	6.04	7.22	5.22	13.45	
Na ₂ O	4.65	5.30	4.60		6.09	2.94	6.93	5.42	4.79	2.88	4.14	
K ₂ O	0.17	0.29	0.24		0.46	0.46	0.16	0.71	0.43	0.63	0.18	
Сумма	96.33	98.38	99.71		96.81	88.60	107.6	96.17	78.74	90.99	96.70	

Формульные единицы в пересчете на 8 атомов кислорода											
Si	2.48	2.60	2.47		2.69	2.41	2.55	2.66	2.52	2.44	2.37
Al	1.52	1.40	1.51		1.28	1.70	1.12	1.39	1.34	1.76	1.53
Fe	0.02	0.06	0.04		0.06	0.08	0.10	0.06	0.13	0.05	0.03
Ca	0.55	0.46	0.56		0.38	0.41	0.67	0.30	0.44	0.27	0.68
Na	0.42	0.47	0.41		0.54	0.30	0.56	0.49	0.53	0.27	0.38
K	0.01	0.01	0.01		0.02	0.03	0.01	0.04	0.03	0.04	0.01
(Si + Al)	4.00	4.00	3.98		3.97	4.11	3.67	4.05	3.86	4.20	3.90
(Ca + Na + K)	0.98	0.94	0.98		0.94	0.74	1.24	0.83	1.00	0.50	1.07
Номер плагиоклаза	55	46	56		38	41	67	30	44	27	68

Примечание. При расчете формул минерала в анализах № 75, 133, 143, 156 железо рассматривается как трехвалентное, входящее, изоморфно с алюминием, в структуру кремнекислородных тетраэдров. В остальных образцах железо рассматривается как двухвалентное.

от андезина 44 до лабрадора 55, 56. Последние составы встречаются чаще на удалении от трещины. Андезин 44–46 характерен для микролитов. Вблизи трещины очертания кристаллов плагиоклаза становятся нечеткими.

Среди новообразований внутри трещины плагиоклаз редок. Его микролиты размером от тысячных до сотых долей мм встречаются как в окружении исключительно смектитового цемента, так и в ассоциации с пироксеном. В последнем случае плагиоклаз присутствует в “островках” пироксен-гематитовой породы, погруженной в смектитовый цемент (см. рис. 4). Колебания состава “трещинного” плагиоклаза очень широки от последних номеров олигоклаза до последних номеров лабрадора (табл. 3). Наиболее часто присутствует андезин № 38–41, более высокие номера характерны для микролитов в ассоциации с пироксеном.

Пироксен. Как указывалось выше, в андезибазальте и его апикальных частях вблизи трещины пироксен присутствует в виде микролитов, заполняющих интерстиции между более крупными кристаллами плагиоклаза. Внутри трещинного пространства выделения пироксена имеют неправильную форму и довольно крупные размеры (~0.05–0.8 мм), что значительно превышает размер ассоциирующего плагиоклаза, и погружены в смектитовый цемент (см. рис. 4). Часто выделения

пироксена имеют неоднородную окраску, отражающую неоднородность его состава (рис. 5), которая сказывается, прежде всего, в том, что в нем отмечается высокое содержание железа и почти полное отсутствие магния и на этом фоне присутствуют широкие вариации Fe и Ca (табл. 4). По количеству железа и кальция можно выделить несколько групп (статистика из 71 анализа). Наиболее распространенная из них – с количеством FeO = 27–29, реже – FeO = 23–25 и 31 мас. %, при этом содержание CaO порядка ~21–28 мас. %. Но, наряду с этим, присутствуют маложелезистые (FeO = 11–13 мас. %) и высококальциевые разности (CaO = 35–36 мас. %). В одном случае встречено соотношение FeO = 2.3 и CaO = 44.5 мас. % (см. рис. 5в, точка 80). Присутствуют высокожелезистые зерна или отдельные участки в зернах с содержанием FeO = 52.7 и CaO = 14.2 мас. %. Во всех группах MgO либо нет, либо его количество ≤2 мас. %. В железистых пироксенах иногда присутствуют титан и ванадий, иногда скандий. Важно, что в составе описываемых пироксенов практически отсутствует магний.

Нанесение полученных данных на диаграмму составов: энстатит ($Mg_2Si_2O_6$)–фассаит ($Fe_2Si_2O_6$)–волластонит ($Ca_2Si_2O_6$) (рис. 6) подтверждает разнообразие состава пироксена.

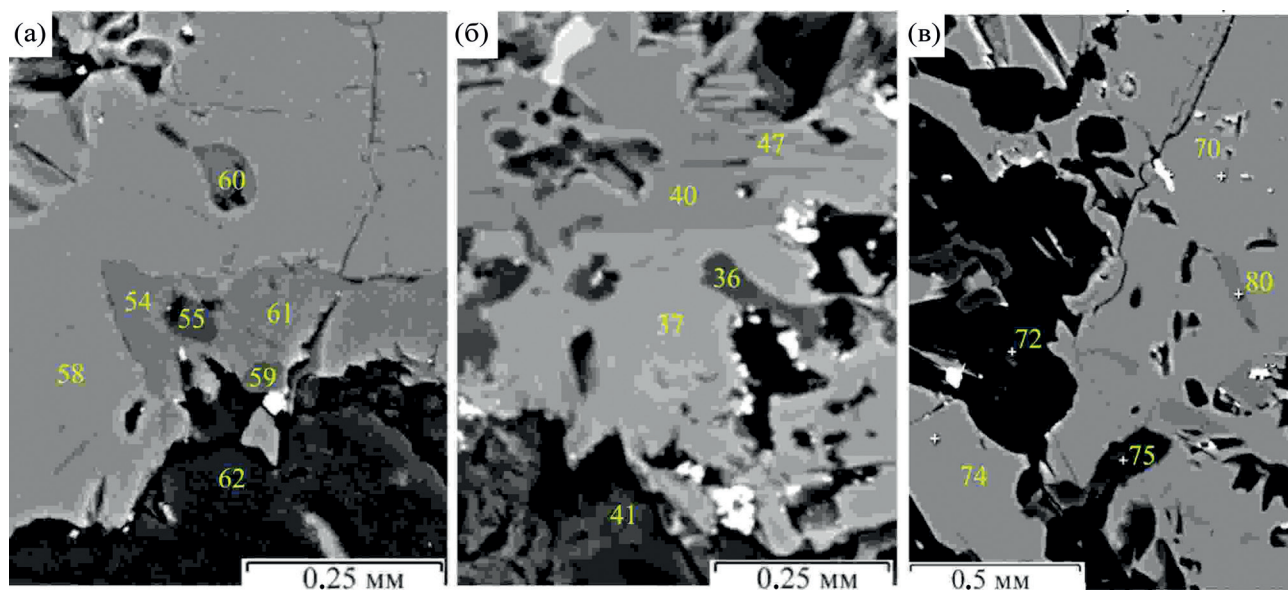


Рис. 5. Неоднородность состава выделений пироксена, присутствующего во внутритрещинном пространстве (см. табл. 4).

Вариации количества FeO в конкретных выделениях пироксена (№ на снимке – ~количество FeO%): а – № 54 – (43), № 55, 60 – (59) № 58, 61 – (24), № 62 – сапонит; б – № 37 – (79), № 40 – (56), № 47 – (66), № 41 – сапонит, № 36 – плагиоклаз; в – № 70, 74 – (24), № 80 – (5), № 72 – сапонит, № 75 – плагиоклаз.

Таблица 4. Химический состав пироксена, обр. В5–6–90ТР (мас. %)

Рисунок	5а				5б						5в				7	
	37	40	47	54	55	58	59	60	61	70	74	80	122	131		
Анализ №																
SiO ₂	30.92	47.88	50.41	46.64	47.99	46.34	52.97	45.79	50.49	48.99	48.65	50.11	42.62	42.81		
TiO ₂	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.40	0.42		
Al ₂ O ₃	0.76	0.76	1.53	1.28	0.38	1.46	—	2.02	—	—	—	—	2.31	2.17		
FeO	52.61	27.75	30.76	22.14	10.95	30.46	11.29	30.33	11.78	11.08	11.26	2.33	29.69	31.07		
MnO	1.54	2.18	1.42	0.28	0.34	0.18	0.31	0.18	0.26	0.21	0.26	—	0.21	0.21		
MgO	0.00	—	2.11	1.13	5.49	—	2.44	—	—	0.41	0.00	0.00	—	0.80		
CaO	14.20	21.46	13.71	28.54	23.39	21.28	33.02	21.25	37.36	35.90	36.04	44.45	20.29	20.48		
Na ₂ O	0.00	—	—	—	0.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
K ₂ O	0.00	—	—	—	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
V ₂ O ₃	0.00	—	—	—	—	0.29	—	0.19	—	—	—	—	0.22	0.19		
Sc ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.21	0.24	—	—	—		
Сумма	100	100	99.94	100	89.19	100	100	99.77	99.88	96.80	95.51	96.90	95.75	91.08		
FeO	78.74	56.39	66.04	42.73	27.49	58.87	24.15	58.80	23.97	23.38	23.80	4.98	59.40	59.35		
CaO	21.25	43.61	29.43	55.08	58.72	41.13	70.63	41.20	76.03	75.75	76.20	95.02	40.50	39.12		
MgO	—	—	4.53	2.19	13.78	—	5.22	—	—	0.89	—	—	0.00	1.53		

Формульные единицы в пересчете анализов на 6 атомов кислорода														
Si	1.34	1.98	2.08	1.88	2.08	1.92	2.07	1.90	2.01	2.00	2.02	2.00	1.84	1.80
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01
Al	0.04	0.03	0.07	0.06	0.02	0.07	—	0.10	—	—	—	—	0.12	0.11
Fe ⁺³	1.28	0.01	—	0.18	—	0.09	—	0.10	—	—	—	—	0.17	0.26
Fe ⁺²	0.62	0.95	1.06	0.57	0.40	0.97	0.39	0.95	0.39	0.38	0.38	0.08	0.90	0.83
Mn	0.06	0.08	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	—	—	—	0.01	0.01
Mg	—	—	0.13	0.07	0.35	—	0.14	—	—	0.02	0.02	—	—	0.05
Ca	0.66	0.95	0.61	1.23	1.09	0.94	1.38	0.94	1.59	1.60	1.60	1.92	0.94	0.92
Na	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V	—	—	—	—	—	0.01	—	0.01	—	—	—	—	0.01	0.01

Примечание. При пересчете анализов на формулу минерала в № 37, 54, 58, 60, 131 часть трехвалентного железа входит в состав тетраэдрических позиций. Ассоциирующие минералы на рис. 5 и 7 – № 41, 62, 72 – смектит, № 36, 76 – платиоклаз; ярко белые точечные выделения – минералы редких земель.

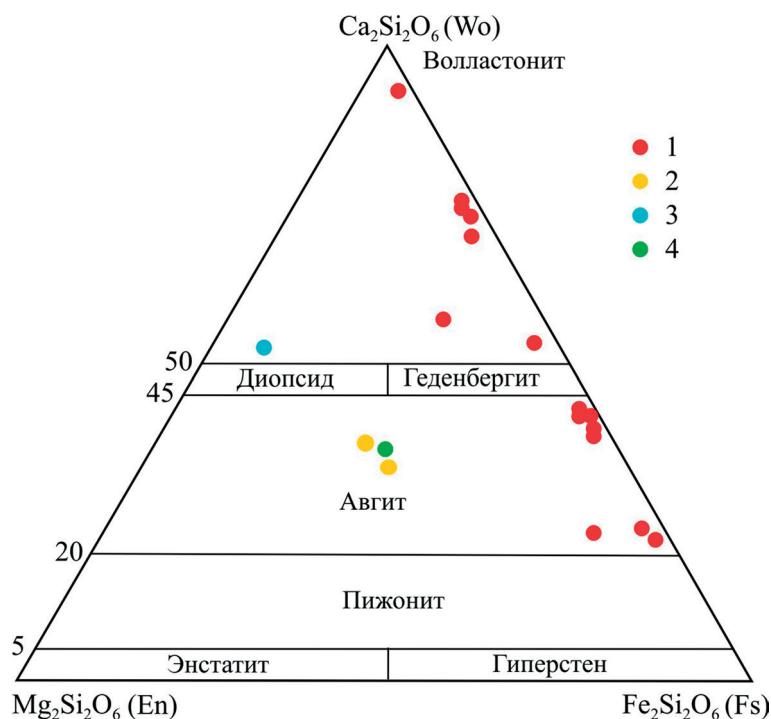


Рис. 6. Диаграмма состава пироксена в андезибазальтах и щелочном базальте вулкана Эсмеральда (основа диаграммы – по [Morimoto et al., 1988]).

1, 2 – состав образцов пироксена из пород из разных зон образца B5–6–90TP: 1 – в трещинном пространстве и вблизи от него (27 анализов), 2 – в отдаленном от зоны трещины пространстве (2 анализа); 3 – состав пироксена в образце щелочного базальта B4–1; 4 – средний (из 5 образцов) состав пироксена в андезибазальтах вулкана Эсмеральда вне исследуемого образца.

Согласно полученным данным, выделяются составы, в которых

1) количество железа резко преобладает над количеством кальция (66–78% FeO против 22–29% CaO) (см. рис. 5б, табл. 4, анализы 37 и 47);

2) количество железа и кальция примерно одинаково FeO ≈ CaO (FeO = 42–59%, CaO = 41–55% (см. рис. 5а, 5б, табл. 4, анализы 40, 54, 58, 60), но в этих рамках в одних случаях железа больше, чем кальция, в других наоборот;

3) FeO значительно меньше, чем CaO (FeO = 23–27%, CaO = 58–76%, (см. рис. 5а, 5в, табл. 4, анализы 55, 59, 61, 70, 74);

4) получен всего один анализ с содержанием FeO = 2.3 мас. % или в составе пироксена 95% CaO и 5% FeO (см. рис. 5в, табл. 4, анализ 80). При почти полном отсутствии магния, согласно диаграмме (см. рис. 6), составы минерала неравномерно распределились вдоль грани фассаит–волластонит с максимумами в областях 40–60 и 20–30% FeO. Первые значения характерны для природного геденбергита, а вторые попадают в зону с практически зеркально высоким содержанием кальция. Ряд анализов отвечают

железистой разности минерала – феррогеденбергиту. Единственный богатый кальцием анализ близок составу волластонита (пироксенид). Присутствуют единичные анализы промежуточные между перечисленными составами.

У пироксена с малым содержанием железа наиболее темный цвет, а с высоким – светлый (см. рис. 5). Соответственно, на снимке геденбергитовая составляющая выглядит более светлой по сравнению с волластонитовой, а границы между ними довольно четкие. Поэтому можно предположить, что кристаллизация пироксенов, обогащенных Fe с одной стороны и Ca – с другой, происходила с некоторым перерывом. Но уверенно определить, какая из разновидностей кристаллизовалась первой, трудно.

Смектит. Минерал наиболее распространен в узкой части трещинного пространства, где заполняет центральную зону. Ассоциирует со всеми остальными новообразованными минералами. Имеет коричневый цвет разных оттенков и, как видно при больших увеличениях СЭМ, образует рыхлые комковатые, иногда листоватые выделения (см. рис. 3–5). На рентгенограмме порошка коричневого заполнения трещинного

Таблица 5. Химический состав сапонита обр. В5–6–90ТР (мас. %)

Анализ №	16	20	51	82	96	111	119	160	161	167
SiO ₂	60.88	54.68	53.20	51.98	59.08	52.32	48.34	50.59	51.17	48.10
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	0.18	0.20	1.48
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	3.25	1.40
Fe ⁺² O	1.43	0.22	2.33	1.85	2.86	1.59	1.43	15.92	15.83	19.92
MnO	0.19	—	0.19	0.25	0.30	0.15	0.21	0.17	0.14	0.21
MgO	29.91	28.98	27.77	27.47	29.00	28.07	26.06	21.34	18.61	22.92
CaO	0.34	0.43	0.56	0.38	0.45	0.46	0.43	0.95	1.65	0.42
Na ₂ O	0.32	—	—	0.24	0.30	—	—	—	0.80	—
K ₂ O	0.13	0.10	—	0.07	—	0.08	—	—	0.22	—
Cl	0.43	0.52	0.35	0.25	0.46	0.14	0.27	—	—	—
Сумма	93.63	84.93	84.40	82.49	92.45	82.81	76.74	89.15	91.87	94.45
Пересчет анализов на 10 атомов кислорода										
Si	3.98	3.92	3.89	3.88	3.94	3.88	3.87	3.77	3.70	3.47
Ti	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01	0.08
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	0.28	0.12
Fe ⁺²	0.08	0.01	0.14	0.12	0.16	0.10	0.10	0.99	0.96	1.20
Mn	0.01	—	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	2.91	3.10	3.03	3.06	2.89	3.10	3.11	2.37	2.01	2.47
Ca	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.13	0.03
Na	0.04	—	—	0.03	0.04	—	—	—	0.11	—
K	0.01	—	—	0.01	—	0.01	—	—	0.02	—
Ca + K + Na	0.07	0.03	0.04	0.07	0.07	0.05	0.04	0.08	0.26	0.03
Mg + Fe + Mn	3.00	3.11	3.18	3.20	3.11	3.21	3.22	3.38	3.06	3.76
Si + Al	3.98	3.92	3.89	3.88	3.94	3.88	3.87	3.77	3.98	3.59
Анионы	O ₁₀ (OH,Cl) ₂ · nH ₂ O									

пространства отчетливо проявлено отражение с межплоскостным расстоянием 14.141 Å, которое при насыщении образца этиленгликолем переходит в положение 16.67 Å. Такое расширение структуры минерала характерно именно для смектитов.

У минерала неоднородный химический состав (табл. 5). Основным катионом, занимающим октаэдрические позиции в структуре, является магний, в небольшом количестве присутствуют железо и иногда марганец. В тетраэдрические позиции в большей части образцов занимает только кремний, но в отдельных образцах есть алюминий в количестве от 0.1 до 0.5 формульных единиц (ф.е.). Межслоевые промежутки заполнены в основном кальцием, реже присутствуют калий и натрий. Но суммарно по сравнению

с теоретическим составом везде наблюдается дефицит этих катионов.

В соответствии с рентгенограммой и химическим составом минерал определен как магний-сметит—сапонит с теоретической формулой (Ca, Na)_{0.3}(Mg, Fe⁺²)₃(Si, Al)₄O₁₀(OH)₂ · nH₂O. В качестве особенности описываемого минерала можно отметить большую неоднородность его состава на отдельных участках трещинного пространства. Наряду с собственно магниевым практически без железа минералом с содержанием Mg от 2.9 до 3.1 ф.е. присутствует сапонит, в котором магний (Mg = 2.01–2.49 ф.е.) занимает октаэдрические позиции совместно с железом (Fe = 0.69–1.20 ф.е.). Важной особенностью описываемого сапонита является присутствие в межслоевых пространствах его структуры иона

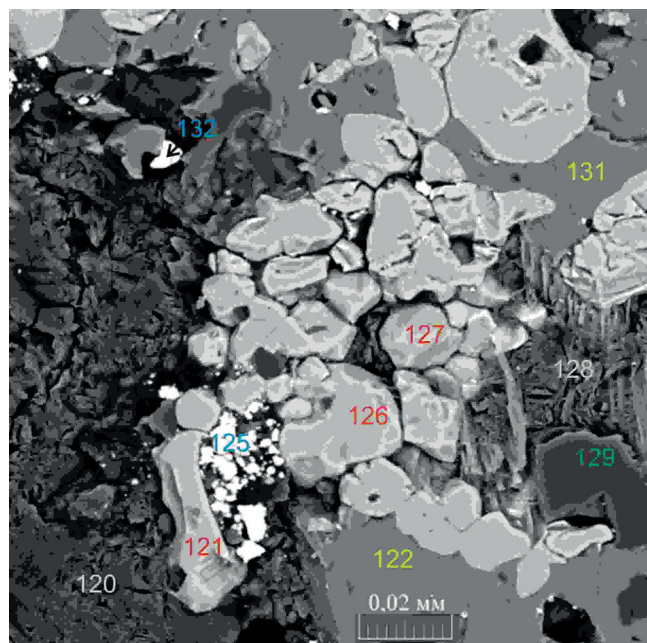


Рис. 7. Друза гематита в ассоциации геденбергитом, плагиоклазом, сапонитом и редкоземельными минералами в центре трещинного пространства. Минералы — № 120, 128 — сапонит, № 122, 131 — геденбергит, № 125, 132 — минералы редких земель, № 121, 126, 127 — гематит, 129 — плагиоклаз андезин 46.

хлора — элемента, характерного для вулканических газов.

Рудные минералы представлены, главным образом, оксидами железа — гематитом и магнетитом, встречаются также единичные зерна халькопирита — сульфида меди и железа.

Гематит (Fe_2O_3) среди рудных минералов, присутствующих внутри трещинного пространства, наиболее распространен, но его количество невелико. Он встречается в центре трещины и по ее периферии, отмечен также в краевых частях газовых пустот. Ассоциируя с сапонитом, феррогеденбергитом и реже плагиоклазом, гематит формируется позже перечисленных минералов, но чуть раньше или одновременно с минералами редких земель. Как правило, встречается в виде друзовых скоплений, состоящих из отдельных относительно хорошо ограненных кристаллов (рис. 7).

Химический состав гематита представлен в табл. 6. Микрозондовый анализ не дает возможности разделить присутствующее в минерале железо по его валентности, но в данном случае можно отметить, что сбалансированные по зарядам формулы получаются при допуске, что все железо трехвалентно.

Состав гематита находится в непосредственной зависимости от того места, где он кристаллизовался. Наиболее чистый, с содержанием $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 95\%$, гематит встречается в центральной зоне трещины, в нем примесь титана порядка 1%, присутствует $\sim 1.5\%$ V_2O_5 и до 1% Al_2O_3 (см. табл. 6, 7, рис. 7, точки 126, 127). В центральных частях трещины кристаллы гематита, морфологически наиболее совершенны, в апикальных частях внутри трещины они становятся менее совершенными и содержат значительно меньше Fe_2O_3 (85–95%). В минерале больше примесных компонентов, в частности, кальция и магния. Величина примеси TiO_2 возрастает до 5.5–7.5%, но количество V_2O_5 падает до $\sim 0.5\%$.

В притрещинной зоне со стороны породы с обеих сторон трещины гематит совместно с геденбергитом занимает положение межзерновых микролитов, и его количество, по сравнению с удаленными от трещины частями породы, резко возрастает. В этой зоне химический состав гематита (см. табл. 7, анализы 1, 8) становится совершенно другим. Количество Fe_2O_3 падает до 60–70 мас. %, но резко растет содержание TiO_2 (26–37 мас. %). Такое количество титана приближает состав минерала к ильмениту FeTiO_3 , в теоретическом составе которого количество железа и титана должно быть примерно равным. В случае описываемого минерала количество железа составляет 1.1–1.2 ф.е., а титана — 0.5–0.6 ф.е., т.е. минерал является высоко титановой промежуточной фазой в ряду гематит–ильменит.

Магнетит ($\text{Fe}^{+2}\text{Fe}^{+3}\text{O}_4$), точнее, титаномагнетит, непосредственно в пределах трещинного и прилегающего к трещине пространства не встречается. Его состав из удаленной от трещины зоны неизмененного андезибазальта приводится для того, чтобы подчеркнуть разницу с составом новообразований гематита. Анализы (см. табл. 7, анализы 9, 10) на кристаллохимическую формулу гематита не пересчитываются (при пересчете на Fe_2O_3 нет баланса зарядов, который соблюден при пересчете на Fe_3O_4). Соответственно, в интерстиционных пространствах вмещающего андезибазальта присутствует магнетит. В его состав в достаточно большом количестве входит титан, но количество последнего равно или меньше, чем в гематите из околотрещинного пространства, прилегающего к трещине. В качестве примеси в магнетите присутствует марганец, почти отсутствующий в гематите, и отсутствует кальций, который для гематита характерен.

Халькопирит. Теоретический состав минерала CuFeS_2 . Встречается редко. Присутствует в виде

Таблица 6. Химический состав гематита, халькопирита, сфена, апатита и арагонита

Минерал	Гематит			Халькопирит					Сфен			Апатит		Арагонит	
	121	126	127	3	86	87	88	90	12	142	150	159	19	81	
Анализ №	SiO ₂	—	—	—	—	—	2.72	—	31.77	29.20	24.82	5.46	—	—	
	TiO ₂	1.27	1.35	1.13	—	—	—	—	33.98	35.75	34.75	0.45	—	—	
	Al ₂ O ₃	0.47	0.55	0.55	—	—	—	—	1.06	0.96	2.19	0.13	—	—	
	Fe ₂ O ₃ + FeO	95.79	99.04	97.31	26.42	26.43	26.84	25.24	27.29	3.95	2.51	0.45	—	—	
	MnO	—	—	0.39	—	—	—	—	—	—	0.19	—	—	—	
Анализ №	MgO	—	—	—	—	—	—	—	0.38	—	0.78	0.12	—	—	
	CaO	0.22	0.13	0.11	—	0.14	0.11	0.23	26.68	25.66	19.38	38.56	54.47	54.32	
	Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.36	0.24	0.24	0.26	
	K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	V ₂ O ₃	1.07	1.19	1.16	—	—	—	—	—	0.79	1.54	—	—	—	
Анализ №	CuO	—	—	—	30.14	29.29	29.09	27.31	30.50	—	—	—	—	—	
	SO ₂	—	—	—	29.15	29.78	30.12	24.97	29.46	—	—	—	—	—	
	CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45.29	45.07	
	P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31.71	—	—	
	Сумма	98.82	102.26	100.65	85.71	85.64	86.16	80.47	87.38	98.61	95.81	92.46	77.12	100.00	99.65

Формульные единицы

Si	—	—	—	—	—	—	—	—	1.06	1.00	0.91	1.17	—	—
Ti	0.03	0.03	0.02	—	—	—	—	—	0.85	0.92	0.96	0.07	—	—
Al	0.01	0.01	0.02	—	—	—	—	—	0.04	0.04	0.09	0.03	—	—
ΣFe	1.92	1.92	1.92	1.00	1.01	1.01	1.02	1.00	0.11	0.07	0.27	0.08	—	—
Mn	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.01	0.04	0.04	—	—
Ca	0.01	—	—	—	—	0.01	0.01	0.01	0.95	0.94	0.76	8.89	0.96	0.96
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01
V	0.02	0.02	0.02	—	—	—	—	—	0.02	0.04	0.04	—	—	—
Cu	—	—	—	1.00	0.99	0.98	0.97	0.99	—	—	—	—	—	—
C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.02	1.01
S	—	—	—	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—	—	—	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.78	—	—

Теоретический состав	Fe ₂ O ₃			CuFeS ₂				CaTiSiO ₄ (O, OH, F)				Ca ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆			CaCO ₃	
----------------------	--------------------------------	--	--	--------------------	--	--	--	---------------------------------	--	--	--	--	--	--	-------------------	--

Таблица 7. Изменение химического состава рудного минерала в крест трещинного пространства

Место	Трещина						Порода			
	центр трещины		край				край		центр	
			слева		справа					
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество анализов	11	3	1	1	1	3	2	1	1	1
SiO ₂	0.05	0.00	3.58	2.47	—	—	0.78	0.41	0.27	0.27
TiO ₂	1.09	1.25	7.17	5.77	7.21	5.44	27.72	36.26	16.05	20.14
Al ₂ O ₃	0.58	0.52	0.92	1.06	0.80	0.79	0.72	0.23	2.67	1.91
Fe ₂ O ₃	96.32	97.38	85.61	88.96	90.34	92.13	67.61	60.33	50.46	48.72
FeO	—	—	—	—	—	—	—	—	25.23	24.36
MnO	—	0.13	—	—	—	0.09	—	—	0.37	0.54
MgO	—	—	1.94	0.88	1.22	0.33	0.14	2.11	1.01	0.63
CaO	0.29	0.15	0.78	0.17	—	0.14	0.61	0.11	—	—
K ₂ O	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—
V ₂ O ₃	1.67	1.14	—	0.58	0.43	0.55	2.39	0.51	0.19	0.06
Сумма	100.00	100.57	100.00	99.99	100.00	99.47	99.97	99.96	96.25	96.63
Пересчет анализов на количество атомов кислорода:										
3									4	
Si	—	—	0.09	0.06	—	—	0.02	0.01	0.01	0.01
Ti	0.02	0.02	0.13	0.11	0.14	0.11	0.50	0.65	0.44	0.55
Al	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.11	0.08
Fe ⁺³	1.91	1.93	1.61	1.70	1.74	1.81	1.22	1.09	1.39	1.32
Fe ⁺²	—	—	—	—	—	—	—	—	0.77	0.73
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.02
Mg	—	—	0.07	0.03	0.05	—	—	—	0.05	0.03
Ca	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	—	0.02	0.02	—	—
V	0.03	0.02	—	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	—
Минерал	гематит Fe ₂ O ₃								магнетит Fe ₃ O ₄	

отдельных кристаллов, размером в тысячные доли мм в ассоциации с поздним гематитом (см. табл. 6, анализы 3, 86–88, 90). Встречено одно относительно крупное зерно, размером ~0.1 мм (анализ 3), на границе породы с полым трещинным пространством. Химический состав минерала практически совпадает с теоретическим. Отмечается постоянная небольшая примесь ванадия и алюминия. Присутствующий в одном из образцов кремний, вероятно, относится к механической примеси аморфного кремнезема.

Сфен. Теоретический состав: CaTiSiO₅(O, OH, F). Минерал в виде выделений размером от тысячных до десятых долей мм встречается в ассоциации с сапонитом и редкоземельными минералами

на границах со свободными пространствами. Химический состав минерала представлен в табл. 6. Количество основных компонентов в минерале близко к теоретическому составу, помимо них присутствуют ванадий, алюминий и реже магний. Среди летучих компонентов фтор не обнаружен, поэтому можно предположить, что в состав минерала входит гидроксильная группа.

Апатит – теоретический состав Ca₁₀(PO₄)₆(OH, F, Cl)₂. Единичная находка минерала, находящегося в ассоциации с сапонитом, отдельные компоненты которого, вероятно, могли быть частично захвачены при анализе. По химическому составу (см. табл. 6) минерал отвечает гидроксилapatиту.

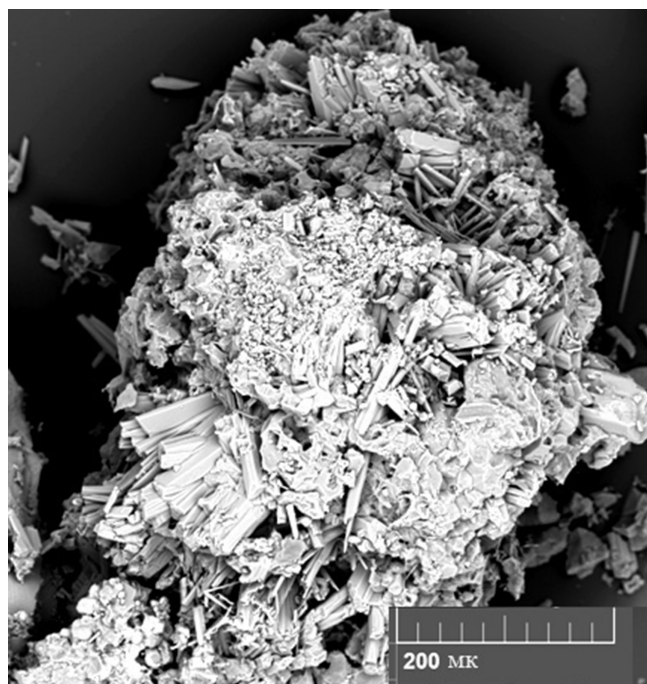


Рис. 8. Арагонит, заполняющий центральные части газовых пустот и “раздувов” трещины (СЭМ).

Карбонат. В узких трещинных пространствах количество карбоната невелико. Он является самым поздним по времени образования аутигенным минералом и развивается после сапонита, заполняя свободные пространства среди агрегатных выделений последнего. В центральных частях газовых пустот и раздуве трещины карбонат является основным минералом (рис. 8). Присутствуют как скрытокристаллические агрегаты минерала, так и его прекрасно образованные кристаллы, растущие вовнутрь свободных пространств. Форма этих кристаллов хорошо видна. Она соответствует форме относительно высокотемпературной ромбической разновидности CaCO_3 — арагониту. По химическому составу (см. табл. 6) минерал “чистый”, никаких примесей, кроме мизерного количества SO_2 , в нем не встречено.

Минералы редких земель. Собственно редкоземельные минералы приурочены к полости трещины и свободным пространствам внутри газовых пустот в прилегающей к трещине части андезибазальта. Минералы образуют скопления плохо оформленных индивидов, размер которых колеблется от 0.001 до 0.04 мм (рис. 9). Для минералов характерны очень высокие интерференционные окраски и высокий рельеф (см. рис. 9в).

Средние (из 71 анализа) химические составы, сгруппированные по количеству РЗЭ

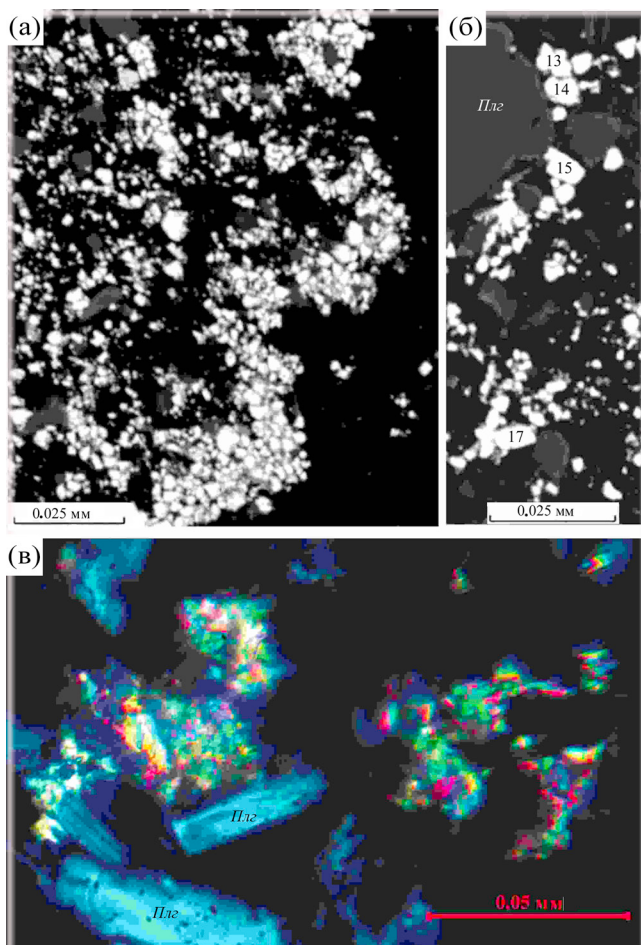


Рис. 9. Локализация редкоземельных минералов в газовой полости.

а, б — СЭМ: а — скопления выделений фтор-гидроксидов РЗЭ в пространстве газовой полости; б — то же, № 13–15, 17 на отдельных кристаллах соответствуют номерам анализов в табл. 9; в — то же, оптический микроскоп (яркие окраски — скопления гидроксидов РЗЭ, Плг — кристаллы плагиоклаза).

в конкретных минералах, образующих скопления, представлены в табл. 8. Во всех анализах присутствует РЗЭ исключительно цериевой группы. Обращает на себя внимание чрезвычайное разнообразие легких РЗЭ в минералах. Обязательным является Се, но наиболее распространены кристаллы с примерно равным содержанием Се и La, количество которых в этих случаях колеблется от 20 до 35 мас. %, как для одного, так и для другого элемента. Встреченные в отдельных кристаллах максимальные количества (мас. %) достигают: Се — до 80, La — до 40, Pr — (0–6), Nd — (0–20), Sm — (0–1), Gd — (0–1.5), при этом Се присутствуют всегда, La отсутствует только в единичных случаях, Pr и Nd — редки, Sm — очень редок, Gd — единичные анализы. Кроме РЗЭ в минералах постоянно присутствуют

Таблица 8. Средний (из 71 анализа) химический состав минералов РЗЭ

Содержание (мас. %)	Ce – <15	Ce – 15–30, La – >20	Ce – 15–30, La – <20	Ce – 30–40	Ce – 40–50	Ce – 50–75	Ce – >75
Количество анализов	15	12	9	20	7	5	3
%	21	17	13	28	10	7	4
Si	8.32	2.07	7.39	1.07	0.51	0.70	0.09
Ti	0.03	–	–	–	–	–	–
Al	0.42	0.58	1.55	0.34	0.09	0.20	0.06
ΣFe	7.75	1.48	3.05	0.42	1.69	0.45	–
Mn	0.01	–	–	–	–	–	–
Mg	2.39	0.69	2.04	0.25	0.13	0.40	–
Ca	8.35	–	3.29	0.55	0.29	0.31	0.11
Na	0.06	0.03	0.40	0.07	–	–	–
K	–	–	0.02	–	–	–	–
S	–	–	0.02	–	–	–	–
Mo	0.10	0.16	–	–	–	0.17	–
V	0.04	–	–	–	–	–	–
La	23.28	37.31	16.60	24.65	25.52	6.28	2.82
Ce	11.16	26.75	26.90	35.62	49.34	68.76	79.01
Pr	2.13	3.90	3.46	4.71	2.96	0.64	1.13
Nd	2.01	1.27	7.23	9.86	0.20	0.47	–
Sm	0.05	–	0.10	0.10	–	–	–
Gd	–	–	–	–	–	–	0.19
F	8.72	14.93	9.17	10.65	7.65	1.26	–
O	25.11	10.82	18.72	11.69	11.61	20.32	16.58
Cl	0.05	–	0.04	–	–	–	–
Сумма	99.98	99.99	99.98	99.98	99.99	99.96	99.99

Ca – десятые доли мас. %, и F – в количестве от 0 до 25 мас. %. Отмечается четкая положительная корреляция между количеством в кристаллах La и F. Максимальное количество фтора в анализах с высоким содержанием лантана и с высоким суммарным содержанием (La + Ce), особенно в тех анализах, где лантана больше, чем церия. В анализах с высоким содержанием Ce фтор отсутствует.

Неусредненный, а конкретный состав отдельных РЗЭ минералов с разными вариациями элементов в составе лантаноидов приведен в табл. 9. Пересчет анализов на минералогические формулы показывает, что большая часть проанализированных зерен близка составу фторгидроксид редких земель, который можно выразить обобщенной формулой $Ln(F, OH)_3$ (где Ln – легкие РЗЭ). В этом случае РЗЭ проявляют свою

обычную валентность 3. Редко встречаются отдельные зерна, состав которых отвечает обобщенной формуле LnO_2 , т.е. оксид РЗЭ, в котором лантаноиды, главным образом Ce, проявляют валентность 4. Нужно заметить, что в состав минералов входит также кальций, но количество этого элемента в большинстве анализов меньше 1.0 мас. %, что отвечает в пересчете на формулу 0.01–0.03 ф.е.

Несмотря на присутствие собственных минералов в трещинном пространстве, суммарное содержание РЗЭ в нем лишь немного превышает фоновые количества в андезибазальтах (табл. 10). В целом в андезибазальтах вулкана Эсмеральда содержание РЗЭ подобно их содержанию в области зоны E-MORB (рис. 10). При этом можно отметить, что конфигурацию тренда E-MORB полностью повторяют РЗЭ только

Таблица 9. Химический состав конкретных единичных кристаллов РЗЭ (мас. %)

Анализ №	13	14	15	17	27	45	52
	La > Ce	Ce > La	La >> Ce	La >> Ce † F	Ce > La † Nd	Ce ~≡ La	Ce
Si	—	0.32	0.2	—	—	1.13	1.22
Al	—	—	—	—	—	0.34	0.23
Fe	—	0.22	—	—	—	1.42	4.07
Mg	—	—	—	—	—	0.98	—
Ca	0.48	0.28	0.41	0.29	0.81	1.2	1.28
La	38.75	32.4	50.03	49.4	23.07	30.5	—
Ce	31.19	36.84	15.16	14.63	33.58	36.39	76.77
Pr	4.49	2.24	4.42	2.62	3.78	3.54	—
Nd	—	—	—	—	9.92	—	—
F	12.09	14.08	17.38	21.45	16.49	9.27	—
O	13	13.01	12.39	11.6	12.35	15.23	16.42
Пересчет анализов на формульные единицы							
Si	—	0.01	0.01	—	—	0.04	0.03
Al	—	—	—	—	—	0.01	0.01
Fe	—	—	—	—	—	0.02	0.07
Mg	—	—	—	—	—	0.04	—
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03
La	0.28	0.23	0.36	0.36	0.17	0.22	—
Ce	0.22	0.26	0.11	0.10	0.24	0.26	0.55
Pr	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	—
Nd	—	—	—	—	0.07	—	—
F	0.64	0.74	0.91	1.13	0.87	0.49	—
O	0.81	0.81	0.77	0.72	0.77	0.95	1.03
Предполагаемая валентность РЗЭ	3	3	3	3	3	3	4
Предполагаемая формула минерала	$Ca_{0.01}Ln_{0.53}[F_{0.64}(OH)^{-}_{0.81}O_{0.08}]_{1.61}$	$Ca_{0.01}Ln_{0.50}[F_{0.74}(OH)^{-}_{0.81}]_{1.55}$	$Ca_{0.01}Ln_{0.50}[F_{0.91}(OH)^{-}_{0.77}]_{1.68}$	$Ca_{0.01}Ln_{0.48}[F_{1.13}(OH)^{-}_{0.37}]_{1.50}^{*} + 0.35 H_2O$	$Ca_{0.02}Ln_{0.51}[F_{0.87}(OH)^{-}_{0.77}]_{1.64} + 0.1 H_2O$	$Ca_{0.03}Ln_{0.50}[F_{0.49}(OH)^{-}_{0.83}O_{0.12}]_{1.44}$	$Ce_{0.55}O_{1.03}$
Баланс зарядов	+1.61	+1.52	+1.92	+1.92	+1.57	+1.56	+2.20
Излишек заряда	-1.61	-1.55	-1.86	-1.86	-1.64	-1.56	-2.06
	0	-0.03	-0.16	0.00	-0.07	0	+0.14

Примечание. Морфологию кристаллов РЗЭ и места их локализации см. рис. 9б.

Таблица 10. Содержание редкоземельных элементов и Hf в породах вулкана Эсмеральда (мг/г)

Источник	Stern, Bibee, 1984			Wang et al., 2020			Pearce et al., 2005		Данные авторов			
Порода	Базальт	Андезибазальт		Базальт			Базальт	Андези-базальт	Андезибазальт		Базальт	
№ образца	M-45-G2	M-46-2	M-46-10B	M-46-11	P07DG06-1	P07DG07-1	P07DG07-3	M46-10b	D20-3-7	B5-6-90-TP(a)	B5-6-90-TP(б)	B4-1
Интервал драгирования, м	300–100	1200–800		1900–1300			1200–800	—	190–150		110–50	
La	—	—	—	—	8.62	8.38	7.69	8.66	7.96	12.2	8.4	53
Ce	17.25	18.34	20.14	18.61	18.52	18.11	15.59	19.9	18.28	28.0	19.0	100
Pr	—	—	—	—	2.79	2.66	2.24	3.12	2.87	4.0	2.9	11.3
Nd	12.01	13.16	14.39	11.35	13.45	13.44	10.79	14.85	13.59	18.0	13.0	44
Sm	3.29	3.74	4.17	3.25	3.86	4.02	2.87	4.19	3.84	5.1	3.8	8.0
Eu	1.20	1.34	1.46	1.21	1.33	1.28	1.01	1.39	1.29	1.93	1.12	2.50
Gd	3.97	4.14	4.90	4.00	4.31	4.48	3.20	4.78	4.36	5.8	4.4	7.8
Tb	—	—	—	—	0.73	0.74	0.51	0.8	0.73	0.96	0.75	1.02
Dy	4.00	4.70	5.02	4.02	4.79	4.71	3.25	5.08	4.63	5.7	4.7	5.5
Ho	—	—	—	—	0.99	1.00	0.69	1.09	0.98	1.16	1.02	0.96
Y	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	27	23.6
Er	12.46	3.08	3.17	2.54	2.88	2.77	1.96	3.1	2.81	3.3	2.8	2.5
Tm	—	—	—	—	0.43	0.43	0.31	0.49	0.44	0.48	0.42	0.31
Yb	2.38	2.63	3.02	2.46	2.76	2.70	1.96	3.12	2.83	3.0	2.6	1.8
Lu	—	—	—	—	0.42	0.41	0.30	0.49	0.45	0.47	0.39	0.26
Hf	—	—	—	—	—	28.5	20.3	2.37	2.15	2.1	2.1	6.6

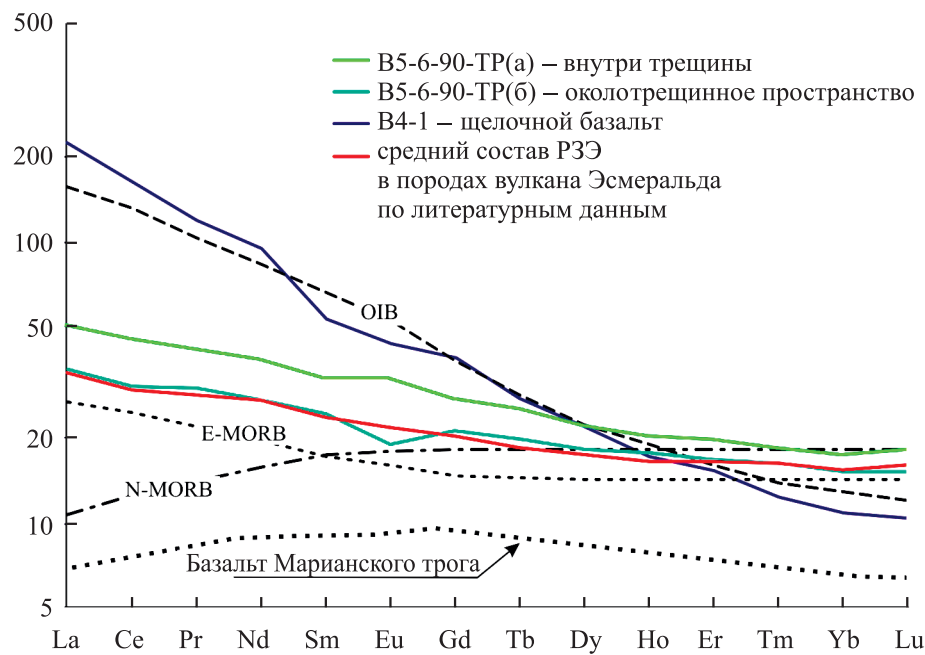


Рис. 10. Спайдер-диаграмма содержания РЗЭ в породах вулкана Эсмеральда. Нормирование по хондриту [Sun, McDonough, 1989], средний состав – из работ [Stern, Bibee, 1984; Pearce et al., 2005; Wang et al., 2021].

цериевой группы, позиция тяжелых РЗЭ тяготеет к нормальным базальтам срединно-океанических хребтов. В андезибазальте образца В5–6–90ТР тренд содержания РЗЭ в породе практически полностью повторяет общий тренд для базальтов и андезибазальтов Эсмеральды, при этом абсолютные значения содержаний чуть выше. В полости трещины направление тренда сохраняется, но содержание всех компонентов заметно выше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенный фактический материал показывает, что наблюдаемое в настоящее время разнообразие минеральных ассоциаций напрямую связано с интенсивностью воздействия наложенных вторичных процессов на первичную породу (табл. 11).

Удаленные от трещинной зоны слабо проницаемые части породы представляют собой

Таблица 11. Минеральные ассоциации из разных по степени проницаемости зон андезибазальта

Морфологические типы, характеризующиеся разными условиями минералообразования	Минеральные ассоциации
Удаленная от трещины и слабо насыщенная газовыми пространствами часть андезибазальта (см. рис. 3, зоны I и VI)	Гломеропорфировые сростки плагиоклаза (лабрадор 67, 68), одиночные вкрапленники плагиоклаза (лабрадор 55, 56), микролиты плагиоклаза (андезин 44, 46), пироксена (авгит), титаномагнетита ($\text{TiO}_2 \sim 18$ мас. %)
Узкая зона с обеих сторон породы, прилегающая к свободным пространствам (апикальную часть породы на границе с трещинным пространством) (см. рис. 3, зоны II, V, IV)	вкрапленники плагиоклаза (андезин 44–46) микролиты плагиоклаза (андезин 38–41, олигоклаз 27–30), геденбергит, титаномагнетит ($\text{TiO}_2 \sim 30$ мас. %)
Центральная и периферийная зоны трещины, периферийные зоны газовых пустот (см. рис. 3, зоны III, VIII)	Плагиоклаз (до лабрадора 67), геденбергит, промежуточный геденбергит, гематит ($\text{TiO}_2 \sim 95$ мас. %), сапонит, минералы редких земель (бастнезит, фторгидроксил), халькопирит, сфен, апатит, редко арагонит
Центральная часть газовых пространств и раздува трещины (см. рис. 2 и 3, зона VII)	Карбонат (арагонит), многочисленные низкоглубинные диатомовые водоросли

Таблица 12. Изменение средних составов пироксена и титаномагнетита по направлению от центра породы к трещине (мас. %)

Минерал	Пироксен		Титаномагнетит—титаногематит	
	центральная андезибазальта	околотрещинная	центральная андезибазальта	околотрещинная
Количество анализов	13	11	2	3
MgO	14.09	1.04	—	—
CaO	17.93	20.77	—	—
FeO + Fe ₂ O ₃	12.92	28.37	74.38	58.44
TiO ₂	—	—	18.09	30.20
V ₂ O ₃	—	—	0.12	1.73

нормальный андезибазальт, крупнопорфировый с вкрапленниками плагиоклаза, микролитами плагиоклаза, пироксена, титаномагнетита и долеритовой структурой основной массы.

Апикальные части андезибазальта вблизи трещинного пространства по структуре и минеральному составу отличаются от удаленных зон породы. В пограничной зоне в теле породы появляется большое количество газовых пустот, структура основной массы становится беспорядочной, расстояния между микролитами плагиоклаза уменьшаются, очертания как вкрапленников, так и микролитов становятся нечеткими. Состав вкрапленников плагиоклаза снижается с лабрадора 67, 68 (преобладающего в удалении) до 55, 56, микролитов — с андезина 44—46 до андезина 38—41. В полости трещины состав плагиоклаза варьирует от последних номеров олигоклаза до первых андезина.

В пироксене почти до нулевых значений падает количество магния и значительно растет содержание железа (табл. 12). В результате в трещинной зоне вместо авгита кристаллизуется геденбергит, в составе которого наблюдается широкий диапазон изоморфизма Ca и Fe. При этом состав минерала варьирует от феррогеденбергита до почти волластонита.

Большие изменения происходят в породообразующем оксиде железа. Во вмещающей породе присутствует магнетит (Fe₃O₄, структура шпинели), в околотрещинной зоне — гематит (Fe₂O₃, структура корунда). По сравнению с магнетитом центральной зоны породы в минерале, локализованном в околотрещинном пространстве, суммарное содержание железа уменьшается практически на 15 мас. %, примерно на такое же количество повышается содержание TiO₂ и увеличивается количество примеси V₂O₃

(см. табл. 12). Состав минерала становится промежуточным между гематитом и ильменитом. В центральной части трещинного пространства развит гематит, содержащий титан в нулевых или малых количествах.

В полости трещины ассоциация пироксен + плагиоклаз + гематит распределена спорадически и суммарные выделения этих минералов образуют “острова” в сапонит-карбонатном окружении (рис. 11). Ксеноморфные выделения пироксена и плагиоклаза тесно переплетены и образуют структуру, напоминающую пертиты, что является признаком их близко одновременного образования. Судя по взаимоотношениям минералов в ассоциации, можно предположить, что одновременно с пироксеном и плагиоклазом формировались зародыши рудного (Fe) минерала, которые впоследствии явились центрами кристаллизации хорошо образованных кристаллов гематита.

Химический состав перечисленных минералов (в том числе пироксена и плагиоклаза) отличается от такового в неизмененных андезибазальтах. Минералы, присутствующие в полости трещины и в околотрещинной зоне андезибазальта, обычно характерны для скарных или магматических пород, претерпевших высокотемпературные преобразования, связанные с внедрением более поздних лавовых потоков. Минералогические последствия подобного внедрения в консолидированные щелочные породы вулканов Купаелло и Колле Фаббри в центральной Италии подробно исследованы А.Т. Николаевой [Николаева, 2014]. Этим автором показано, что в контаминированных щелочных вулканитах (терминология А.Т. Николаевой), согласно результатам декрепитации газовой-жидких включений, волластонит кристаллизуется

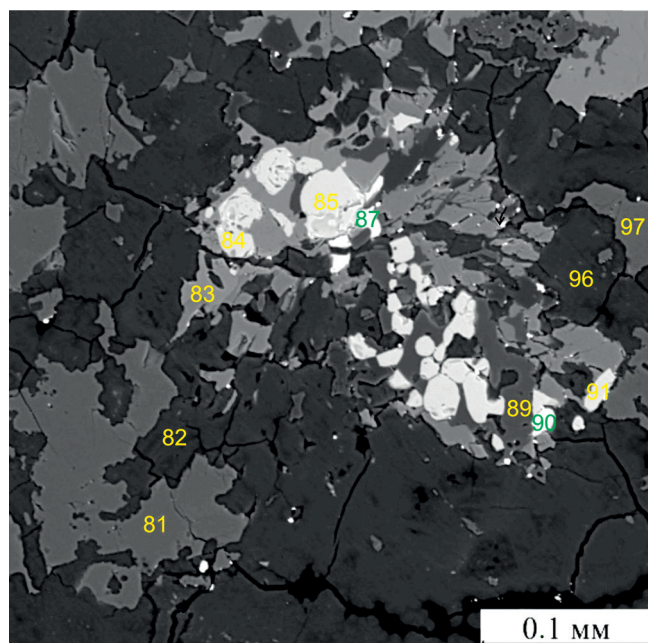


Рис. 11. Заполнение трещинного пространства минеральной ассоциацией плагиоклаз + пироксен + гематит + сапонит.

Минералы: № 81, 97 — арагонит, № 82, 96 — сапонит, № 83 — геденбергит, № 89 — плагиоклаз, № 84, 85, 91 — гематит, № 87, 90 — халькопирит.

На снимке мелкие ярко белые точки — выделения редкоземельных минералов.

в интервале температур 1240–1320°C, а геденбергит при 1150–1180°C. Образование этих минералов по данным А.Т. Николаевой [Николаева, 2014] происходило из гомогенной мелилититовой магмы, обогащенной CO₂ и содержащей 0.5–0.6 мас. % H₂O и 0.1–0.2 мас. % F. Кроме того, внутри трещинного пространства наблюдаются переходные фазы в ряду феррогеденбергит–геденбергит–волластонит (см. рис. 6), а согласно справочным данным [Спиридонов, 2023], неограниченная взаимная растворимость пироксенов ($\text{MgMgSi}_2\text{O}_6 - \text{Fe}^{+2}\text{Fe}^{+2}\text{Si}_2\text{O}_6 - \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 - \text{CaFe}^{+2}\text{Si}_2\text{O}_6$) возможна только при весьма высоких температурах. Исходя из этого, логично предположить, что перечисленные минералы формировались при высокотемпературном воздействии на первичную породу.

Низкотемпературный минерал сапонит (группа глины) образуется в совершенно иных условиях, температура его кристаллизации не может превышать 450°C. Если бы сапонит кристаллизовался при этой и более низкой температурах непосредственно из минералообразующего субстрата, он должен был бы захватывать и перекрывать поверхность ранее сформировавшихся

высокотемпературных минералов, проникать в их межзерновые пространства, корродировать поверхность ранее образовавшихся кристаллов. Такого не наблюдается. Наоборот, на снимках (см. рис. 7, 11) хорошо видна граница между апикальной частью породы и сапонитом, и очевидно, что высокотемпературные минералы развиваются даже позднее окружающей гомогенной массы. Логично предположить, что сапонит не первичен, а замещает матрицу, которой мог быть остаточный расплав, заполнявший трещину и из которого могли кристаллизоваться высокотемпературные минералы. Косвенным свидетельством такой возможности могут служить характерные для стекловатых фаз трещины растрескивания, хорошо видные на всех снимках. После кристаллизации Са- и Fe-минералов расплав обогащался магнием, что благоприятствовало последующему замещению его Mg-сапонитом.

Приведенный фактический материал позволяет восстановить историю формирования породы и слагающих ее минеральных парагенезисов. Предполагается, что тектонические подвижки, которые характерны для вулкана Эсмеральда, привели к возникновению в исходных вмещающих андезибазальтах проницаемых зон. Вследствие перепада давления из глубинного магматического резервуара по ослабленным путям просочились порции расплава, состав которых отличался от состава магмы, исходной для вмещающих андезибазальтов. Резкий перепад давления привел к ураганному выходу из внедрившегося расплава флюида, обогащенного HF, SO₂, CO₂, H₂, H₂O. Предполагается, что именно флюид является переносчиком РЗЭ, с последующим их отложением, при изменении физико-химических условий, в трещинных и поровых пространствах в виде минеральных ассоциаций.

Кристаллизация внедрившегося внутритрещинного расплава шла, по крайней мере, тремя параллельными путями. Первый — нормальная кристаллизация расплава в его внутренней части. Результирующая в этом процессе минеральная ассоциация состояла из геденбергита и основного плагиоклаза.

Второй путь — преобразование расплавом краевых частей вмещающего андезибазальта и частичное их переплавление, приведшее к перекристаллизации микролитов плагиоклаза, изменению состава межзернового пироксена и повышенному количеству микролитов титаномагнетита. Результирующая минеральная ассоциация — мелкокристаллические

титаномagnetит + относительно кислый (вплоть до олигоклаза) плагиоклаз + феррогеденбергит.

Третий путь — пневматолитовый — осаждение рудной и редкоземельной минерализации из газовой-жидкой фазы. При этом формируются своего рода возгоны, среди которых определены гематит, халькопирит, рутил, сфен, оксиды и фторгидроксиды РЗЭ. Устойчивые минеральные парагенезисы не образуются, а наблюдаются минеральные индивиды или друзья минералов одного состава, территориально приуроченные к периферическим зонам газовых полостей.

В отношении РЗЭ еще раз обратим внимание на то, что количество этих элементов, как в андезибазальте, так и суммарном заполнении трещины примерно одинаково. Исходя из этого, присутствие обильной редкоземельной минерализации в трещинном пространстве можно объяснить только наличием “внутренних фумарол” и специфических условий, благоприятных для осаждения РЗЭ из флюидной фазы. Это, в частности, высокая температура и умеренное давление внутри изолированного пространства в вулканической постройке, покинуть которое газовой-жидкой фазе невозможно.

Освобождение растворенных в расплаве газов и формирование газовых пустот приводит к увеличению проницаемости трещины и ее расширению, что, в свою очередь, ведет к возможности обводнения трещинного пространства и понижения температуры внедрившегося расплава. В результате кристаллизации плагиоклаза, Fe-Са-пироксена, Fe-Са- и РЗЭ-минералов остаточный расплав обогащается магнием, что способствовало либо образованию магниевого стекла, впоследствии замещенного Mg-сапонитом, либо, при быстром остывании остаточного расплава, непосредственной кристаллизации сапонита. В ассоциации с сапонитом наблюдается арагонит, кристаллизации которого способствует высокий потенциал CO_2 , сохраняющийся в зоне реакции, и повышенная температура (при прочих равных условиях, но при низкой температуре образовалась бы низкотемпературная полиморфная разновидность арагонита — кальцит).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное изучение минерального состава андезибазальта, рассеченного трещиной, позволило впервые для вулкана Эсмеральда установить присутствие ассоциации минералов, не характерных для подводных вулканических пород. Во внутритрещинном пространстве

и прилегающих зонах андезибазальта определены широкие диапазоны состава плагиоклаза (от олигоклаза до лабрадора последних номеров), установлена возможность природной смеси составов Fe-Са-пироксенов в ряду феррогеденбергит—геденбергит—волластонит, выявлены оксиды, гидроксиды и фторгидроксиды РЗЭ, показана разница в составе минералов ряда магнетит—гематит.

Предполагается, что тектонические подвижки привели к возникновению проницаемых зон в образовавшихся ранее андезибазальтах. Вследствие перепада давления из глубинного магматического резервуара по ослабленным путям просочились новые порции обогащенного флюидами расплава, состав которых отличался от состава магмы, исходной для вмещающих андезибазальтов. Небольшие объемы внедрившегося расплава, заполнившего трещину, не позволили газовой составляющей расплава пробить “броню” из перекрывающих пород и водной массы. Резкий перепад давления привел к ураганному выходу газов из внедрившегося расплава. Высокие температуры и давления привели к возможности экстракции флюидом, насыщенным H_2O , CO_2 и HF, соединений металлов, присутствующих в исходном расплаве. При последующем осаждении соединений РЗЭ, связанном с изменением физико-химических условий внутри газовых полостей и трещин, образовались минеральные фазы оксидов, гидроксидов и фторгидроксидов РЗЭ.

Впервые для вулкана Эсмеральда установлено присутствие в трещинах и газовых полостях андезибазальта собственных минералов РЗЭ (F-гидроксидов, гидроксидов и оксидов). В составе этих минералов присутствуют только легкие РЗЭ, среди которых преобладают Ce и La. Концентрация РЗЭ в полости трещины и во вмещающем андезибазальте лишь слегка превышает соответствующие значения E-MORB, т.е. средние содержания РЗЭ в областях срединно-океанических хребтов. За экстракцию РЗЭ и осаждение, а также за формирование минералов отвечают, вероятнее всего, специфические условия, создавшиеся во внутренних частях постройки вулкана Эсмеральда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Э.Э. Сендерова за помощь в интерпретации полученных результатов и рецензентов, чьи конструктивные замечания позволили улучшить качество представленных материалов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзаданий Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН “Петролого-геохимические и минералогические особенности вулканизма Курило-Камчатской дуги как отражение глубинных процессов в северо-западной части Тихого океана на меловом и кайнозойском этапах” (№ государственной регистрации НИР АААА-А20-120121090011-4) и “Закономерности строения и эволюции Курило-Камчатской островодужной системы и прикамчатской акватории Тихого океана: геохимические и минералогические особенности пород, источники вещества, породообразующие процессы, полезные ископаемые”, а также Геологического института РАН “Мезомасштабные структуры океанического дна: строение, состав, происхождение, рудообразование” (№ государственной регистрации НИР 122011800645-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ананьев В.В., Петрова В.В., Рашидов В.А. Состав пород подводного вулкана Эсмеральда (Марианская островная дуга) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2023 г. / Гл. ред. член-корр. РАН А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023а. С. 14–17.

Ананьев В.В., Петрова В.В., Рашидов В.А. Новые данные о петролого-минералогическом составе пород, слагающих подводный вулкан Эсмеральда (Марианская островная дуга) // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва 13–17 ноября 2023 г. М.: ИО РАН, 2023б. Т. II. С. 14–18.

Ананьев В.В., Петрова В.В., Рашидов В.А. Подводный вулкан Эсмеральда (Марианская островная дуга) и некоторые особенности слагающих его горных пород // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 48–63.

Горшков А.П., Абрамов В.А., Сапожников Е.А., Селиверстов Н.И., Рашидов В.А. Геологическое строение подводного вулкана Эсмеральда // Вулканология и сейсмология. 1980. № 4. С. 65–78.

Колосков А.В., Рашидов В.А., Ананьев В.В. Первая находка шпинель-лерцолитового ксенолита “нео-

фиолитового типа” в задуговом бассейне Марианской островодужной системы // Океанология. 2020. № 4. С. 629–647.

<https://doi.org/10.31857/S0030157420040139>

Николаева А.Т. Петрология мелилитсодержащих пород вулканов Купаелло и Колле Фаббри (Центральная Италия) / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук: специальность 25.00.04. Новосибирск, 2014. 148 с.

Спирidonov Э.М. Генетическая минералогия. 2023. 558 с. <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/genetic-mineralogy-spiridonov-p2-MK.pdf>

Fedyunina N.N., Seregina I.F., Bolshov M.A. et al. Investigation of the efficiency of the sample pretreatment stage for the determination of the Rare Earth Elements in rock samples by inductively coupled plasma mass spectrometry technique // Analytica Chimica Acta. 2012. V. 713.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginsburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki A., Gottardi G. Nomenclature of pyroxenes // Mineralogist. 1988. V. 73. P. 1123–1133. https://rruff.info/uploads/MM52_535.pdf

Pearce J.A., Stern R.J., Bloomer Sh.H., Fryer P. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction Components // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005. V. 6. № 7. Q07006. 27 p. <https://doi.org/10.1029/2004GC000895>

Stern R.J., Bibee L.D. Esmeralda Bank: Geochemistry of an active submarine volcano in the Mariana island arc and its implication for magmagenesis in island arcs // Carnegie Institution of Washington Year Book. 1980. V. 79. P. 465–472.

Stern R.J., Bibee L.D. Esmeralda Bank: Geochemistry of an active submarine volcano in the Mariana Island Arc // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. V. 86. P. 159–169.

Stern R.J., Bloomer Sh.H., Ping-Nan Lin, Smoot N.Chr. Submarine arc volcanism in the southern Mariana Arc as an ophiolite analogue // Tectophysics. 1989. V. 168. № 1–3. P. 151–170.

Wang X., Wang Z., Liu Y., Park J-W., Kim J., Li M., Zou Z. Calcium Stable Isotopes of Tonga and Mariana Arc Lavas: Implications for Slab Fluid-Mediated Carbonate Transfer in Cold Subduction Zones // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. V. 126. e2020JB020207. 19 p. <https://doi.org/10.1029/2020JB020207>

UNUSUAL MINERALIZATION IN BASALTIC ANDESITE OF SUBMARINE VOLCANO ESMERALDA (MARIANA ISLAND ARC)

V. A. Rashidov^{1, *}, V. V. Petrova^{2, **}, V. V. Ananyev¹, N. V. Gorkova²

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: rashidva@kscnet.ru*

***e-mail: v.petrova.v@gmail.com*

The results of studies of a basaltic andesite sample complicated by a mineralized crack and voids, with a crack and gas voids filled with secondary mineralization dredged on the Esmeralda underwater volcano, are presented. A detailed comparative study of the mineral composition of the substance lining the crack, the space around the crack, and the part of basaltic andesite unaffected by secondary changes made it possible for the first time for the underwater Esmeralda volcano to establish the presence of an association of minerals that is not characteristic of unaltered volcanic rocks. In the intracrack space and adjacent zones of basaltic andesite, wide ranges of plagioclase composition were determined, isomorphism in the Fe-Ca-pyroxene series was studied, REE oxides, hydroxides and fluorohydroxides were studied, and variability in the composition of minerals in the magnetite-hematite series was shown. It is assumed that tectonic movements led to the emergence of permeable zones in the previously formed basaltic andesites through which new portions of the melt leaked. In a limited space, high fluid gas saturation, temperature and pressure made it possible to extract metal compounds from the melt and host rocks.

Keywords: Esmeralda submarine volcano, basaltic andesite, hedenbergite, Rare Earth Element minerals, volcanic gases