ТИХООКЕАНСКАЯ ГЕОЛОГИЯ, 2017, том 36, № 1, с. 52–69

УДК 551.217.1(571.645)

КИСЛЫЕ МАГМЫ КАЛЬДЕРНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ОСТРОВА ИТУРУП: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ВО ВКРАПЛЕННИКАХ ПЕМЗ КАЛЬДЕРЫ ЛЬВИНАЯ ПАСТЬ И ПЕРЕШЕЙКА ВЕТРОВОЙ

С.З. Смирнов[1,2], А.В. Рыбин[3], Е.Н. Соколова[1,2], Д.В. Кузьмин[1,4], А.В. Дегтерев[3], Т.Ю. Тимина[1]

[1]ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090; e-mail: ssmr@igm.nsc.ru

[2]ФГАОУВО Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр-т Ленина 36, г. Томск, 634050; e-mail: e.post@ngs.ru

[3]ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022; e-mail: a.rybin@imgg.ru

[4]ФГАУВО Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, г. Новосибирск, 630090; e-mail: kuzmin@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 4 апреля 2016 г.

В статье представлены первые результаты петрологических исследований кислой пирокластики сильнейших кальдерообразующих извержений острова Итуруп. Показано, что пемзы кальдер Львиная Пасть и перешейка Ветрового имеют сходные черты и являются результатом эволюции расплавов кислого состава, возникших в результате плавления метабазитов. Минералотермометрические исследования свидетельствуют о том, что кристаллизация расплава происходила при температурах, близких к 800 °С. Образование вкрапленников пемз перешейка Ветрового шло при давлениях около 1 кбар, в то время как вкрапленники из пемз кальдеры Львиная Пасть кристаллизовались при более высоких давлениях. Составы пирокластики обеих кальдер отвечают умеренно глиноземистым дацитам и риодацитам нормального ряда, расплавы которых не претерпели существенной кристаллизационной дифференциации перед извержением. Главными летучими компонентами магм являлись H_2O, CO_2, S, F и Cl. Дегазация с выделением водно-углекислотного флюида сопровождала раннюю кристаллизацию плагиоклаза из пемз перешейка Ветрового. Признаков дегазации расплавов Львиной Пасти до извержения установить не удалось. Принимая во внимание данные по обоим вулканическим центрам, можно заключить, что выделение воды из расплавов могло быть сопряжено как с ранней дегазацией (перешеек Ветровой), так и с извержениями (перешеек Ветровой, Львиная Пасть). Отсутствие признаков глубокой дифференциации и смешения расплавов говорит об относительно небольшом промежутке времени между возникновением очагов кислой магмы и извержениями.

Ключевые слова: **кальдеры, кальдерные извержения, пирокластика, пемза, расплавные включения, летучие, кислые расплавы, дегазация, метабазальты, плавление о. Итуруп.**

ВВЕДЕНИЕ

Большая Курильская гряда (БКГ) представляет собой типичную внутреннюю вулканическую дугу Курило-Камчатской островодужной системы и протягивается от полуострова Камчатка до о. Хоккайдо на 1250 км. Основной особенностью ее строения является широкое развитие позднекайнозойских вулканических и вулканогенно-осадочных отложений, сформировавшихся в стадию развития островодужных поднятий.

Кислые вулканиты в составе островодужной ассоциации играют подчиненную роль по сравнению с основными и средними. Количество кислого материала среди вулканических и интрузивных образований Курильской островной дуги закономерно увеличивается в южном направлении [10]. Тем не менее, они являются важными индикаторами процессов формирования и преобразования коры островной дуги. С проявлениями кислого вулканизма часто связана рудная минерализация.

Дациты и риолиты, образованные в четвертичном периоде, приурочены к гомодромно развивающимся вулканическим центрам. Они появляются либо в тесной связи с непрерывными андезибазальтовыми и андезитовыми сериями, либо сопряжены с заключительными стадиями эволюции вулканов – кальдерообразованием и посткальдерной экструзивной деятельностью.

Пемзово-пирокластические отложения, связанные с крупномасштабными кальдерными извержениями, широко распространены в курильском секторе Курило-Камчатской островной дуги [1, 3, 4, 6, 8–11], однако, по сравнению с кальдерами полуострова Камчатка, им уделялось недостаточно внимания, особенно в части петрологических исследований.

Одними из наиболее масштабных событий рубежа позднего плейстоцена–голоцена являются извержения, приведшие к образованию мощных пемзово-пирокластических толщ перешейков Ветровой, Дозорный и Рока в южной и центральной частях острова Итуруп (рис. 1). В литературе отсутствуют данные, которые позволили бы реконструировать для этих извержений параметры эволюции магматических очагов (P-T-fO_2), их состав, размеры, положение и общие черты петрогенезиса кислых пород в современной истории развития вулканизма южной части Курильской островной дуги. Целью данной работы является реконструкция составов магматических расплавов, предшествовавших извержениям кислой пирокластики позднеплейстоценовых кальдер Львиная пасть и перешейка Ветровой.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кальдера Львиная Пасть (ЛП) расположена в юго-западной части о. Итуруп (рис. 1 а). Кальдерная впадина заполнена водами Охотского моря, с которым она соединяется проливом шириной ~5 км. В средней части кальдеры глубины варьируют в пределах 400–450 м, при максимуме ~535 м. В плане она имеет форму эллипса, длинная ось которого вытянута в меридиональном направлении. Его размеры в поперечнике – 7×9 км, площадь кальдерной полости – ~50 км^2. Схематическое описание кальдеры дано в работах [1, 3–5]. Внутренние стенки кальдеры крутые, местами вертикальные. В них обнажаются многочисленные потоки лав и пирокластики, почти повсеместно пронизанные дайками. Пемзово-пирокластические отложения, связанные с формированием кальдеры, слагают перешейки Дозорный и Рока. Объем изверженного материала оценивается 70–80 км^3 [7]. По данным сейсмоакустических исследований, объем кальдерной впадины составляет 55–70 км^3 [1]. В ней выделяются системы кольцевых разломов, свидетельствующие о двух этапах формирования кальдеры. Эти представления подтверждаются недавно проведенными исследованиями. На рубеже позднего плейстоцена–раннего голоцена с вулканом Львиная Пасть ассоциировались, по крайней мере, два крупных эксплозивных извержения: ~ 12300 и ~ 13000 л. н. [5].

Низменный перешеек Ветровой (ПВ) в северной части острова Итуруп в структурном плане является грабеном, ограниченным субмеридиональными разломами, шириной около 12 км (рис. 1 б). Пемзовый пирокластический материал и продукты его разрушения слагают практически весь перешеек Ветровой. В центральной части перешейка выделяются остатки крупной кальдерной постройки диаметром 6–7 км [3]. Средняя высота по гребню соммы около 180 м, максимальная – 264 м. В южной части кальдеры, на тихоокеанском побережье, расположена цепочка синкальдерных экструзивных куполов дацитового состава, наиболее крупные из них слагают мысы Евгения и Конакова. Посткальдерная деятельность связана с образованием пемзово-пирокластического конуса высотой около 200 м в западной части кальдеры, маара озера Тайное диаметром около 0.7 км в северной части атрио и вулкана Клумба (андезибазальтовый стратовулкан высотой 164.6 м с хорошо выраженным вершинным кратером).

По оценке И.В. Мелекесцева [7] объем изверженных пород кальдеры перешейка Ветрового (ПВ) составляет около 100 км^3. Возраст пемзы из средней части разреза, по данным термолюминесцентного анализа, около 20000 лет. В определенной степени эти данные подтверждаются результатами радиоуглеродного датирования органики из толщи отложений, подстилающих пирокластику ПВ, возраст которой составляет 42967 ± 633 л. н. (ГИН-7094) [2].

Объемы пемзовых отложений и размеры кальдер свидетельствуют о том, что они являются результатами крупных извержений кислой магмы, масштабы которых соизмеримы с минойским извержением вулкана Санторин [18].

Пемзы обоих проявлений, несмотря на различный возраст, имеют очень близкие составы (табл. 1). Они отвечают умеренно глиноземистым дацитам нормального ряда с содержанием калия от низкого до умеренного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Валовый химический состав образцов был определен в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Определение содержаний H_2O, п.п.п., SiO_2 выполнено методом гравиметрии аналитиком В.Н. Каминской, микроэлементы – методом атомно-эмиссионной спек-

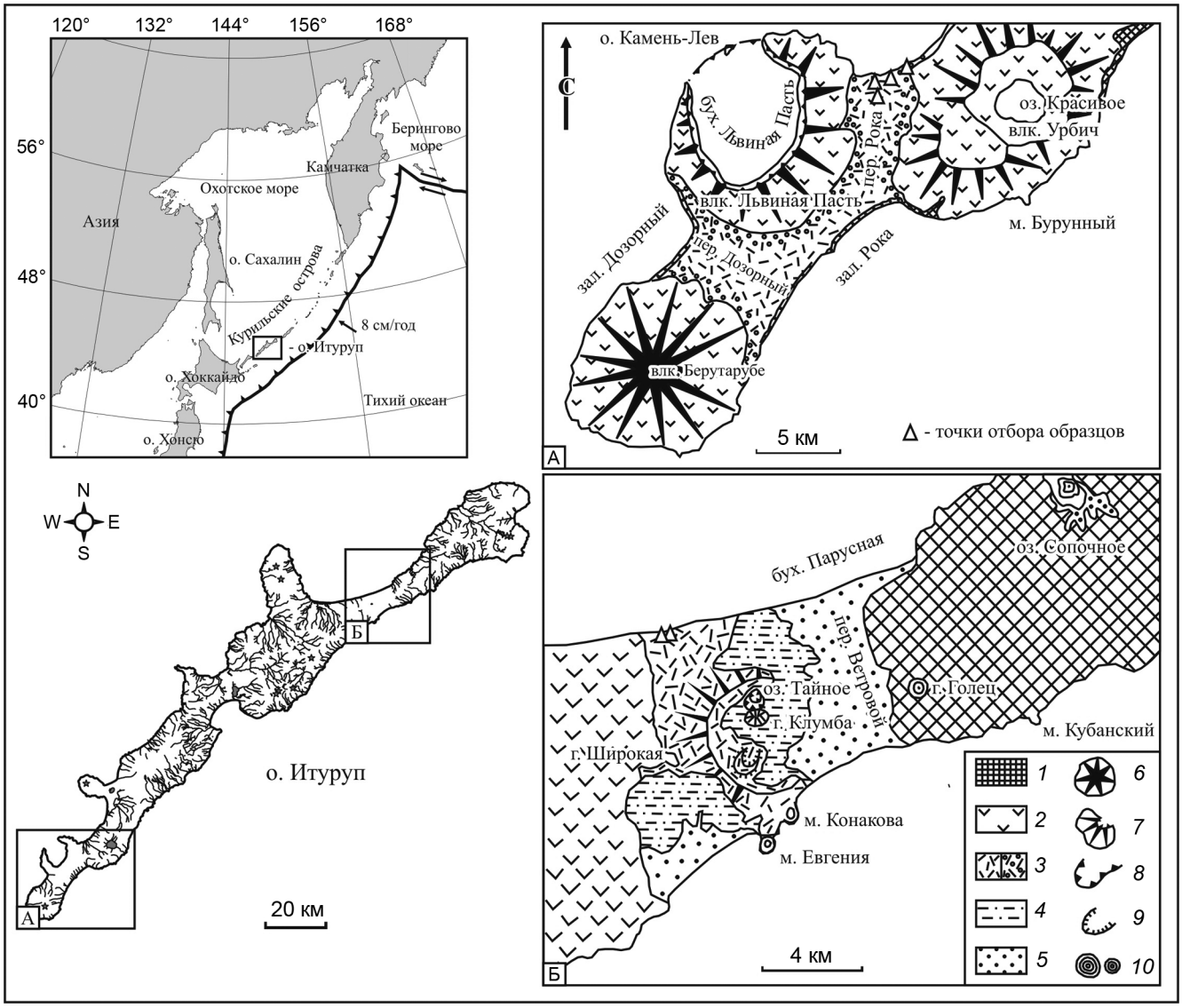

Рис. 1. Геологическая схема южной части о. Итуруп и перешейка Ветрового, по [11] с изменениями и дополнениями.

1 – фундамент; *2* – эффузивы четвертичных вулканов; *3* – пирокластические отложения: существенно пемзовые (а) и с примесью окатанных обломков эффузивов (б); *4* – отложения 80–120 м морской террасы; *5* – отложения низкой морской террасы и пляжей; *6* – вулканические постройки; *7* – вулканические постройки сильно расчленные; *8* – уступы кальдер; *9* – эрозионные уступы; *10* – экструзивные купола. Треугольниками обозначены места отбора образцов.

трометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500 Duo (Thermo Electron Corporation, США) аналитиками Г.И. Горбач, Е.А. Ткалиной, Н.В. Хуркало (табл. 1).

Магматические вкрапленники были отмыты из пемзовых лапиллей и вручную отобраны под бинокулярным микроскопом. Для исследования включений вкрапленники были смонтированы в шашки из эпоксидной смолы и отполированы. Включения изучались с помощью оптического поляризационного микроскопа. При комнатной температуре были установлены фазовый состав включений, их приуроченность к различным зонам роста, определено их происхождение и степень нормальности/аномальности. Вкрапленники, содержащие включения размером более 8–10 мкм, были отобраны для дальнейших исследований.

Для получения информации по составам расплавов были использованы природно-закаленные включения, содержащие при комнатной температуре либо только одну фазу силикатного стекла, либо стекло и мелкий усадочный пузырек. Включения выводились на поверхность для микроаналитических исследований путем стачивания на алмазных пастах. Составы расплавных включений определялись методами электронно-микрозондового анализа. Определение главных компонентов проводилось методом энерго-

Таблица 1. Представительные анализы пирокластики пемзовых отложений кальдер Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

Кальдера	Львиная пасть					Перешеек Ветровой	
Обр.	2/9/13	4/9/13	4А/9/13	4Б/9/13	5/9/13-П	Р30/13	Р32/13
				мас. %			
SiO_2	67.76	67.06	67.28	67.22	67.64	68.10	66.34
TiO_2	0.45	0.48	0.48	0.41	0.44	0.53	0.58
Al_2O_3	15.44	14.84	14.28	14.98	14.82	14.32	14.19
Fe_2O_3	1.49	1.84	1.96	1.43	1.42	1.85	2.24
FeO	2.10	2.07	2.26	1.93	2.13	2.03	2.10
MnO	0.12	0.13	0.14	0.11	0.12	0.11	0.12
MgO	1.12	1.25	1.44	1.04	1.11	1.16	1.37
CaO	4.28	4.43	4.06	4.14	4.27	3.93	4.03
Na_2O	4.02	3.98	3.88	4.07	4.02	3.95	3.91
K_2O	1.18	1.12	1.19	1.21	1.21	1.19	1.14
P_2O_5	0.09	0.12	0.09	0.11	0.10	0.10	0.11
H_2O-	0.12	0.07	0.08	1.04	0.09	0.18	0.21
ППП	2.17	2.32	2.60	2.72	2.79	2.45	3.22
Сумма	100.34	99.71	99.74	100.41	100.14	99.89	99.55
				г/т			
Li	11.3	11.1	10.2	11.3	11.4	11.9	9.30
Be	0.53	0.58	0.52	0.51	0.48	0.53	0.58
Rb	20.7	20.3	21.3	21.5	21.7	18.4	18.2
Sr	306	295	280	290	295	208	207
Y	31.8	32.8	33.4	31.8	34.5	37.3	37.5
Zr	123	118	123	122	127	125	121
Nb	1.20	1.16	1.20	1.11	1.71	1.30	1.30
Cs	1.44	1.46	1.47	1.50	1.53	1.26	1.24
Ba	324	315	321	322	337	288	280.
La	7.98	8.23	8.12	8.19	8.50	7.38	7.59
Ce	20.2	20.0	20.1	20.2	21.1	19.1	19.3
Pr	2.81	2.85	2.86	2.86	2.94	2.83	2.76
Nd	13.4	13.6	13.9	13.6	14.0	14.1	13.9
Sm	3.81	3.96	4.08	3.93	4.00	4.32	4.16
Eu	1.07	1.13	1.09	1.07	1.10	1.14	1.09
Gd	4.44	4.88	4.71	4.50	5.03	5.08	5.23
Tb	0.74	0.80	0.81	0.74	0.81	0.92	0.90
Dy	5.09	5.38	5.52	5.13	5.80	6.11	6.22
Ho	1.12	1.21	1.18	1.14	1.26	1.43	1.34
Er	3.43	3.65	3.82	3.58	3.86	4.22	4.41
Tm	0.53	0.56	0.55	0.55	0.59	0.63	0.62
Yb	3.61	3.68	3.79	3.65	3.88	4.26	4.30
Lu	0.60	0.61	0.65	0.59	0.63	0.65	0.66
Hf	3.34	3.27	3.40	3.40	3.48	3.54	3.38
Ta	0.09	0.09	0.08	0.10	0.18	0.10	0.10
Pb	8.14	8.03	8.05	8.46	8.48	9.25	8.60
Th	2.08	1.95	1.99	2.07	2.15	1.64	1.62
U	0.70	0.72	0.69	0.74	0.77	0.59	0.61

дисперсионной спектрометрии (ЭДС) на СЭМ Tescan Mira 3LMU с полевой эмиссией (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток зонда 1 нА. Для уменьшения эффекта потери натрия при анализе водосодержащих кислых стекол [26–28] анализ проводился в режиме сканирования площадки от 5×5 до 20×20 мкм в зависимости от размеров включений. Время счета было установлено 60 сек, что обеспечивало пределы обнаружения около 0.1–0.3 мас. %. Калибровка прибора осуществлялась по набору хорошо охарактеризованных искусственных соединений и природных минералов.

Содержания F, Cl, S и P определялись на электронном микрозонде JEOL JXA 8100 методом ВДС.

Интенсивности F измерялись на спектрометре с LDE кристаллом-детектором, P – на PETH, а S и Cl – на спектрометрах с PETJ. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 100 нА. Для минимизации матричных эффектов (для корректного расчета поправочных коэффициентов) использовался ZAF метод коррекции, остальные главные элементы при измерении были заданы офф-лайн в соответствии с данными, полученными ЭДС методом. Время измерения интенсивности аналитической линии составляло 60 сек. Калибровка осуществлялась по составам природного Cl-апатита (Cl и P), халькопирита (S) и синтетического F-флогопита (F). Правильность анализа контролировалась периодическим измерением стандартов вулканических стекол VG-2 [24] и CFA-47 (GeoRem Database: http://georem.mpch-mainz.gwdg.de). Минимальные измеряемые концентрации при выбранных параметрах составили для Cl – 0.003 мас. %, для S – 0.021 мас. % SO_3, для P – 0.011 мас. % P_2O_5. Уменьшение интенсивности аналитической линии от времени для измеряемых элементов не отмечается.

Присутствие воды в стекле расплавных включений определялось качественно методом рамановской спектроскопии и оценивалось количественно по недостатку суммы микрозондового анализа. Пересчет на нормативный минеральный состав производился методом CIPW.

Анализ минералов и кристаллических включений осуществлялся так же, как и анализ стекол расплавных включений. Дополнительный контроль правильности анализа производился пересчетом на формульные единицы.

Состав флюидных включений и флюидных обособлений в расплавных включениях изучался методом рамановской спектроскопии.

МИНЕРАЛОГИЯ

Пемзы обоих проявлений внешне очень похожи. Это белые или светло-серые сильно пористые породы, содержащие большое количество порфировых вкрапленников. Вкрапленники погружены в стекловатый матрикс, имеющий волокнистое строение. Макроскопически в ассоциациях вкрапленников пемз ЛП и ПВ доминируют кварц, плагиоклаз, клинопироксен, Mg-Fe пироксен и рудные минералы. Пемзы ЛП отличаются от пемз ПВ обилием вкрапленников амфибола.

Mg-Fe пироксены. Вкрапленники этих минералов представляют собой хорошо образованные кристаллы (рис. 2 а–в) коричневого цвета. Принципиальной разницы во внешнем облике кристаллов из пемз ЛП и ПВ нет. Кристаллы пироксенов обоих проявлений содержат большое количество минеральных и расплавных включений. Изученные вкрапленники Mg-Fe пироксенов ПВ содержат включения апатита, плагиоклаза, магнетита и ильменита. В наборе минеральных включений ЛП дополнительно присутствуют амфибол и клинопироксен. Доля ильменита среди включений рудных минералов во вкрапленниках ЛП выше, чем в ПВ. Часто ильменит и магнетит встречаются в пределах одной зоны роста или даже в сростках. Во вкрапленниках Mg-Fe пироксенов из пемз ЛП встречаются включения Fe и Cu-Fe сульфидов.

В пемзах обоих вулканических центров Mg-Fe пироксены по составу отвечают гиперстену с Mg# 0.62–0.64, содержанием волластонитового минала не более 2 мол. % и повышенными концентрациями MnO (рис. 3 а, табл. 2). Отличия между ними минимальны, однако гиперстены ЛП систематически отличаются от ПВ чуть более высоким содержанием Mg# и более низким Al_2O_3 и CaO (табл. 2). Отчетливой зональности по составу вкрапленники гиперстена не проявляют (рис. 2).

Клинопироксены обоих проявлений также образуют хорошо ограненные кристаллы (рис. 2 г), содержащие обильные включения кристаллов апатита, магнетита, ильменита, плагиоклаза и застекловавшегося расплава. Ильменит был обнаружен в клинопироксенах из пемз ЛП. По составу вкрапленники соответствуют высококальциевому авгиту (Wol = 0.43–0.44) с Mg# 0.73–0.74 (рис. 3 а). При этом авгиты ЛП отличаются от авгитов ПВ более низким TiO_2, MnO, Na_2O и высокими Al_2O_3. Аналогично гиперстенам авгиты не проявляют отчетливой зональности состава.

Нахождение авгита и гиперстена в виде включений друг в друге или в виде сростков вкрапленников в пемзах ЛП и ПВ дает возможность оценить температуру, при которой эти два минерала могли находиться в равновесии, по [25]. Точки на рис. 3 б показывают, что эти температуры для обоих вулканических центров были в пределах погрешности близки к 800°C.

Амфиболы. Вкрапленники амфибола были обнаружены только в пемзах ЛП в виде хорошо образованных кристаллов. В пемзах ПВ вкрапленники амфибола отсутствуют, но этот минерал был обнаружен в виде включения в одном из вкрапленников гиперстена.

В качестве включений в амфиболах ЛП установлены магнетит, апатит и плагиоклаз. Вкрапленники обладают достаточно выдержанным составом (табл. 2). Содержание Na+K в позиции щелочи составляет 0.31–0.36 ф.е., что заставляет рассматривать их как Ca амфиболы, относящиеся к серии роговой обманки, а содержание Al, превышающее 1 ф.е., и Mg# 0.66–0.68 – относить их к железистым гастингситам. Для гастингситов ЛП характерно невысокое содержание Cl (< 0.13 мас. %). Зональность по составу у вкрапленников амфибола отсутствует.

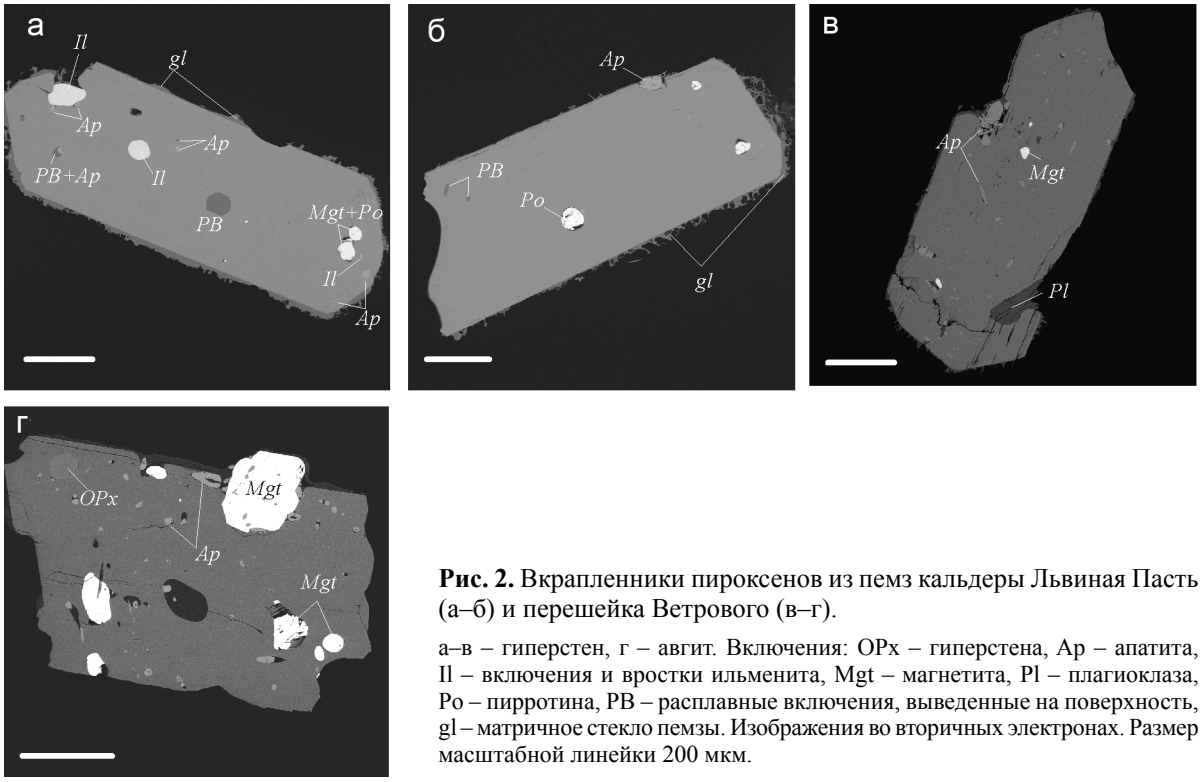

Рис. 2. Вкрапленники пироксенов из пемз кальдеры Львиная Пасть (а–б) и перешейка Ветрового (в–г).

а–в – гиперстен, г – авгит. Включения: OPx – гиперстена, Ap – апатита, Il – включения и вростки ильменита, Mgt – магнетита, Pl – плагиоклаза, Po – пирротина, PB – расплавные включения, выведенные на поверхность, gl – матричное стекло пемзы. Изображения во вторичных электронах. Размер масштабной линейки 200 мкм.

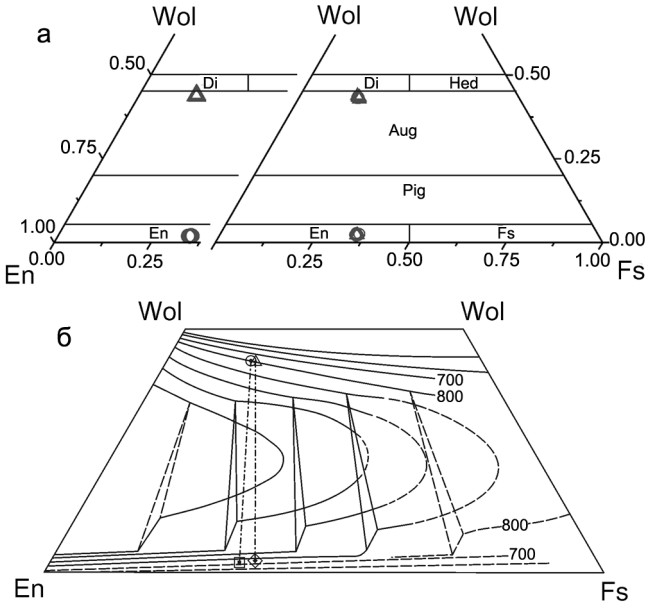

Рис. 3. Составы и классификация вкрапленников пироксенов в пемзах кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

а – классификационное положение составов пироксенов ЛП (слева) и ПВ (справа) (треугольники – авгит, кружки – гиперстен), б – оценка температуры образования по паре гиперстен-авгит [25], где кружком (авгит) и квадратом (гиперстен) обозначена пара из пемзы кальдеры Львиная Пасть (обр. р2-9/20) и треугольником (авгит) и ромбом (гиперстен) – пара из пемзы перешейка Ветрового (обр. ИТ-49).

Плагиоклазы, так же как и темноцветные минералы, образуют хорошо ограненные кристаллы (рис. 4 а, в). В отличие от темноцветов они обычно содержат существенно меньшее количество кристаллических включений, среди которых установлены авгит, гиперстен, апатит, магнетит и ильменит (рис. 4 б). Плагиоклазы относятся к бинарному твердому раствору (табл. 3). Содержания K_2O не превышают 0.16 (ПВ) и 0.25 (ЛП) мас. %. Составы вкрапленников варьируют в пределах $An_{39–80}$ (ПВ) и $An_{47–79}$ (ЛП). На рис. 4 а отчетливо видно, что неоднородность состава вкрапленников плагиоклаза не описывается обычной ритмической зональностью. Часто неоднородность по составу выражается в пятнистом строении (например, рис. 4 а). В пределах одного вкрапленника плагиоклаза может быть представлен весь диапазон составов, от наиболее основных до наиболее кислых. При этом зоны с наиболее высоким содержанием кальция часто занимают промежуточное положение и не приурочены к ядерным частям кристаллов. На рис. 5 представлены профили через зональные кристаллы (рис. 5 а, в). Общая картина зональности позволяет заключить, что в ходе кристаллизации вкрапленников происходили флуктуации ее параметров, которые приводили к резкому увеличению основности плагиоклаза.

Вкрапленники **кварца** обоих проявлений**,** в отличие от рассмотренных выше темноцветов и плагиоклаза, имеют неправильную изометричную форму.

Таблица 2. Средние составы темноцветных минералов вкрапленников в пемзах кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

	Mg-Fe пироксены				Клинопироксены						Амфиболы		
	Львиная Пасть		Ветровой		Львиная Пасть			Ветровой			Львиная Пасть		
	центр	край	центр	край	центр	вкл. в OPx	вкл. в Pl	центр	край	вкл. в Pl	центр	вкл. в OPx	вкл. в Mgt
	n(12)	n (2)	n (4)	n (7)	n(6)	n(1)	n(1)	n(5)	n(1)	n(6)	n (7)	n (2)	n(1)
SiO_2	52.59 ± 0.22	52.95	52.66 ± 0.47	52.97 ± 0.39	52.44 ± 0.52	52.48	52.26	52.99 ± 0.19	51.55	52.92 ± 0.40	47.91 ±0.47	47.23	47.41
TiO_2	0.06 ± 0.07	0.05	0.20 ± 0.14	0.04 ± 0.08	0.17 ± 0.09	0.20	0.30	0.26 ± 0.04	0.26	0.24 ± 0.04	1.52 ± 0.08	1.64	1.68
Al_2O_3	0.54 ± 0.10	0.49	0.78 ± 0.38	0.39 ± 0.18	1.07 ± 0.11	1.06	1.34	0.93 ± 0.11	0.89	0.95 ± 0.05	6.59 ± 0.27	7.09	6.71
FeO	21.25 ± 0.30	21.35	21.94 ± 0.24	22.08 ± 0.21	9.06 ± 0.13	9.40	8.90	9.51 ± 0.17	9.39	9.32 ± 0.22	13.11 ± 0.20	13.24	13.96
MnO	1.49 ± 0.07	1.56	1.37 ± 0.05	1.35 ± 0.05	0.42 ± 0.28	0.20	0.30	0.7 ± 0.05	0.64	0.61 ± 0.05	0.46 ± 0.03	0.46	0.43
MgO	22.42 ± 0.17	22.38	21.74 ± 0.26	21.83 ± 0.06	14.27 ± 0.23	14.34	14.03	14.29 ± 0.07	13.86	14.33 ± 18	15.02 ± 0.13	15.03	14.86
CaO	0.97 ± 0.09	1.02	1.15 ± 0.07	1.11 ± 0.06	21.03 ± 0.26	21.11	21.04	20.76 ± 0.13	20.33	20.82 ± 0.19	10.83 ± 0.10	10.75	10.62
Na_2O	н.о.	н.о.	нпо	0.03 ± 0.08	0.28 ± 0.04	0.38	0.36	0.34 ± 0.04	0.25	0.31 ± 0.04	1.45 ± 0.06	1.54	1.55
K_2O	н.о.	н.о.	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.14 ± 0.02	0.15	0.16
P_2O_5	н.о.	н.о.	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	н.о.	н.о.	н.о.
Cl	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.09 ± 0.04	0.08	нпо
Сумма	99.60	99.81	99.83	99.80	98.98	99.75	99.03	99.77	97.17	99.50	97.13	97.18	97.37
En	62.5	62.2	61.0	60.9	40.7	40.5	40.3	40.4	40.2	40.6	-	-	-
Fs	35.6	35.8	36.7	36.7	15.2	15.2	14.8	16.2	16.4	15.8	-	-	-
Wo	1.9	2.0	2.3	2.3	44.1	44.3	44.8	43.4	43.4	43.6	-	-	-
Mg#	0.65	0.65	0.64	0.64	0.74	0.73	0.74	0.73	0.72	0.73	0.67	0.67	0.65

Примечание. н.о. – не определялось, нпо – ниже предела обнаружения, n – количество анализов.

Таблица 3. Составы плагиоклазов из пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

	Львиная Пасть					Ветровой			
	1*	2**	3	4	5	6	7**	8*	9
SiO_2	56.65	48.06	51.50	53.70	54.54	57.51	47.13	59.02	47.01
Al_2O_3	27.30	33.23	30.27	29.55	28.43	26.76	32.78	26.13	32.42
FeO	0.40	0.45	1.17	0.48	0.61	0.42	0.57	1.24	0.79
CaO	9.54	16.11	12.79	11.61	11.13	8.98	16.01	8.27	15.98
Na_2O	5.97	2.42	4.03	4.73	5.14	6.28	2.17	6.94	2.27
K_2O	0.10	нпо	0.04	0.13	0.06	0.13	нпо	0.12	нпо
Сумма	99.96	100.27	99.84	100.20	99.91	100.08	98.66	101.72	98.47
An	46.7	78.7	63.6	57.2	54.3	43.8	80.3	39.4	79.6
Ab	52.8	21.3	36.2	42.1	45.3	55.4	19.7	59.9	20.4
Or	0.6	0.0	0.2	0.8	0.3	0.8	0.0	0.7	0.0

Примечание. * – состав зоны с минимальным анортитовым компонентом, ** – состав зоны с максимальным An#, 3 – кристаллическое включение в ортопироксене, 4 – вкрапленник плагиоклаза в срастании с клинопироксеном, 5 – плагиоклаз из комбинированного расплавного включения в амфиболе, 8 – кристаллическое включение в ортопироксене, 9 – кристаллическое включение (зональный микровкрапленник) в клинопироксене, нпо – ниже предела обнаружения.

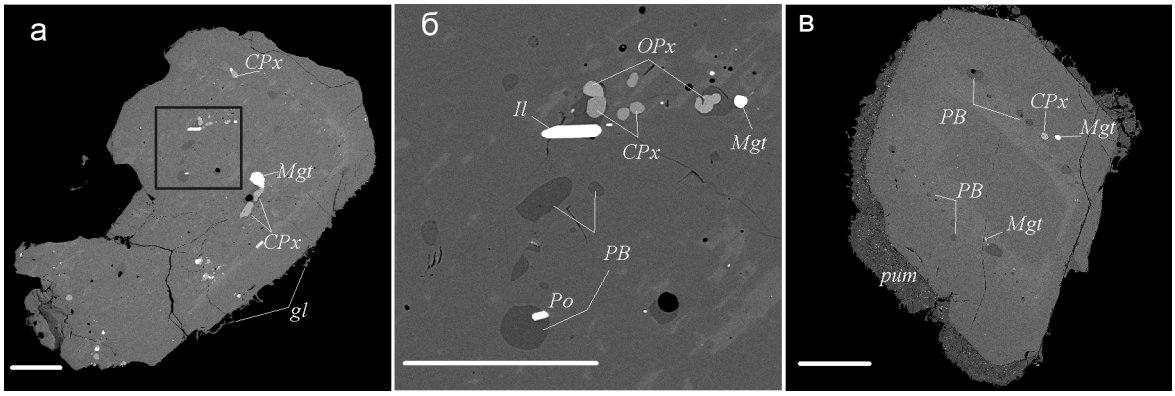

Рис. 4. Вкрапленники плагиоклазов в пемзах перешейка Ветрового (а-б) и кальдеры Львиная Пасть (в).

а – общий вид вкрапленника плагиоклаза, б – увеличенное изображение фрагмента вкрапленника, показанное на рис. 4а черной рамкой, в – общий вид вкрапленника. Включения: OPx – гиперстена, CPx – авгита, Il – включения и вростки ильменита, Mgt – магнетита, Po – пирротина, PB – расплавные включения, выведенные на поверхность, gl – матричное стекло пемзы, pum – тонко раскристаллизованная основная масса пемзы. Изображения во вторичных электронах. Размер масштабной линейки 200 мкм.

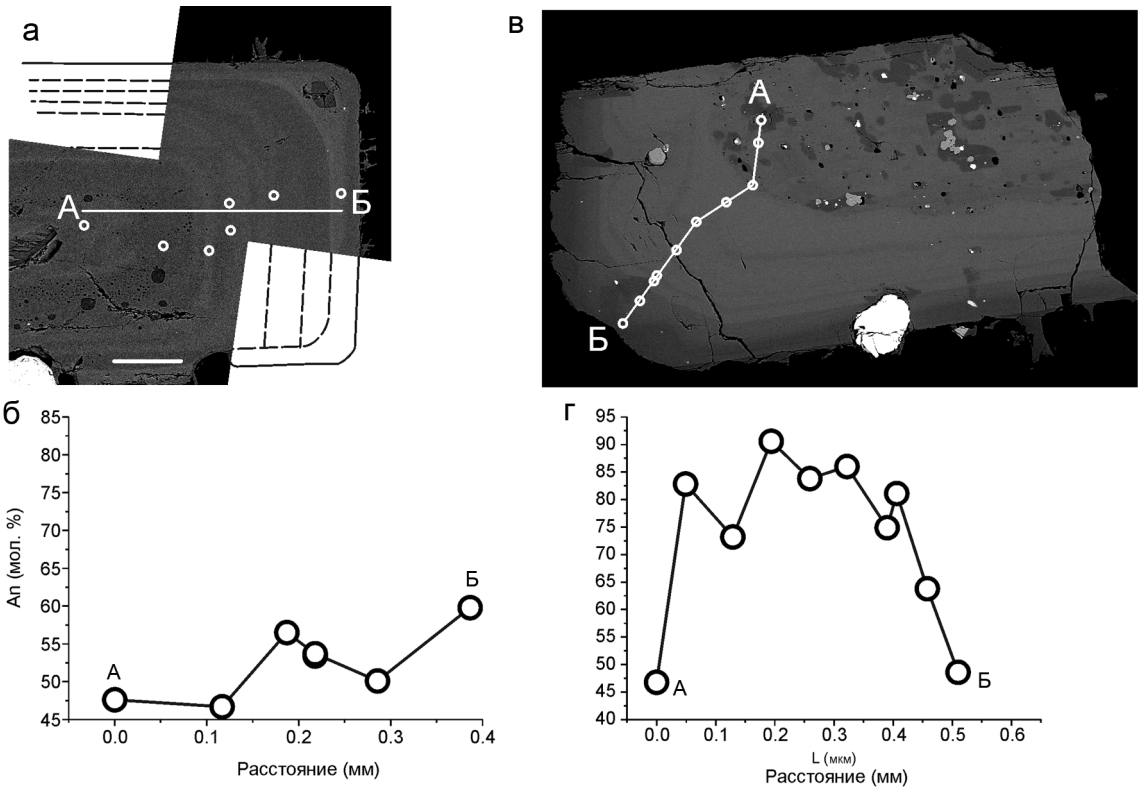

Рис. 5. Химическая зональность вкрапленников плагиоклаза из пемз кальдеры Львиная пасть (а, б) и перешейка Ветрового (в, г).

а и в – изображения вкрапленников во вторичных электронах на СЭМ, показаны точки, где производился анализ, и линии профилей; б и г – изменение An# (на рис. 5 б в качестве расстояний взяты интервалы между проекциями точек анализа на линию профиля).

Методом катодолюминесценции было установлено, что отчетливая зональность в них отсутствует. Кварц не содержит включений других минералов и не встречен в сростках с другими вкрапленниками.

Апатит не был найден в виде вкрапленников, но является самым распространенным среди кристаллических включений в темноцветных минералах. Составы апатита приведены в табл. 4. Предварительные

Таблица 4. Состав включений апатита во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой.

	Львиная Пасть							Ветровой			
Минерал-хозяин	OPx	OPx	OPx	OPx	CPx	Pl	Amph	Opx	OPx	CPx	Mgt
SiO_2	0.81	0.75	0.86	0.66	0.71	0.66	0.86	нпо	0.88	1.58	нпо
FeO	1.05	1.03	0.94	1.51	0.53	0.28	0.82	0.51	1.01	0.81	1.43
MnO	0.23	0.18	0.22	0.18	нпо	0.17	0.21	0.21	0.18	0.18	0.14
MgO	нпо	0.22	0.20	0.15	0.18	0.15	0.27	0.15	0.13	нпо	0.13
CaO	52.26	51.97	52.08	52.67	52.78	52.61	52.26	52.33	51.74	51.18	51.83
Na_2O	нпо	нпо	0.26	нпо	нпо	0.28	0.26	нпо	нпо	0.31	нпо
SrO	1.19	1.15	1.22	1.14	1.17	1.17	1.19	но	но	но	но
P_2O_5	41.36	41.18	41.20	42.00	41.91	42.12	41.59	41.73	41.42	39.92	41.63
SO_3	0.35	0.25	0.95	0.30	0.35	0.27	0.95	но	0.41	0.82	0.15
Cl	1.63	1.61	1.69	1.67	1.67	1.70	1.75	1.67	1.76	1.71	1.67
F	1.80	1.76	1.82	2.04	1.91	2.25	1.80	2.14	2.11	3.00	2.23
Сумма*	99.55	99.00	100.29	101.08	100.03	100.33	100.81	97.46	98.35	97.86	97.84

Примечание. * – сумма за вычетом O-(F,Cl)2, нпо – ниже предела обнаружения, но – не определялось.

исследования методом ЭДС показали, что апатиты обоих проявлений содержат значительные примеси Fe (до 1.0 мас. % FeO), Mn (около 0.2 мас. % MnO) и Sr (около 1.2 мас. % SrO в апатитах ЛП). Кроме этого, для них характерно повышенное содержание серы (до 0.80 (ПВ) и 0.95 (ЛП) мас. % SO_3). В среднем апатиты обоих проявлений содержат более 2.0 мас. % F и 1.7 мас. % Cl. Атомное отношение F/Cl в них составляет приблизительно 2.

Магнетит и ильменит образуют сростки с темноцветными минералами и плагиоклазом и встречаются в них в виде включений. Рудные минералы из пемз обоих вулканических центров содержат в виде включений Fe и Fe-Cu сульфиды. В изученных магнетитах отсутствуют структуры распада твердых растворов. По данным ЭДС примесь Ti составляет около 4.0 мас. % в магнетитах ЛП и около 5.3 мас. % в магнетитах ПВ. В качестве стабильных примесей присутствуют Mn, Mg и V. Ильменит в пемзах ЛП чаще встречался, чем в пемзах ПВ. Аналогично магнетитам, ильмениты обоих проявлений в качестве примесей содержат Mn, Mg и V.

ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД

Все исследованные минералы содержат множество расплавных включений (РВ). В большинстве случаев включения образуют азональные группы или приурочены к зонам роста или регенерации вкрапленников. Пироксены и кварц содержат, как правило, только азональные группы в разных частях кристаллов. В плагиоклазах присутствуют как зональные, так и азональные включения. Апатит также содержит расплавные включения трубчатой формы, которые чаще всего расположены по центру вдоль длинной оси кристаллов. Такое расположение включений в разных вкрапленниках свидетельствует об их первичности. По фазовому составу при комнатной температуре РВ могут быть разделены на 3 группы (рис. 6): однофазовые стекловатые (1) (рис. 6 а, в); двухфазовые, содержащие стекло и газовый пузырек (2) (одно из включений на рис. 6а и мелкие включения на рис. 6 б); многофазовые, содержащие стекло, кристаллы и/или газовый пузырек (3) (рис. 6 в). В качестве кристаллических фаз во включениях 3 типа обнаружены апатит, магнетит, ильменит, пирротин, гиперстен и авгит. Все эти минералы встречаются в виде кристаллических включений и не являются дочерними для РВ. Как следствие, этот тип включений рассматривается как аномальный. В темноцветных минералах доминируют РВ 1 и 3 типов, в кварце и плагиоклазах – 1 и 2 типов. Для целей данной работы отбирались включения 1 и 2 типов. То, что они не содержат дочерних кристаллических фаз, позволяет рассматривать их как закаленные в ходе извержения материнские расплавы.

Флюидные включения (ФВ) обнаружены только в плагиоклазе из пемз ПВ (рис. 7). Эти включения также могут быть разделены на три типа. К первому типу относятся ФВ, содержащие при комнатной температуре только газовую фазу (рис. 7 а, б, ФВ I). Методом рамановской спектроскопии было установлено, что она состоит из малоплотной CO_2. Установить присутствие паров воды и газообразных соединений серы в ней не удалось.

ФВ второго типа при комнатной температуре содержат жидкую и газообразную фазы (рис. 7 а, б, ФВ II). Жидкая фаза представлена водным раствором, а в газовой иногда фиксируются небольшие количества CO_2. Объемные соотношения газовой и жидкой фаз

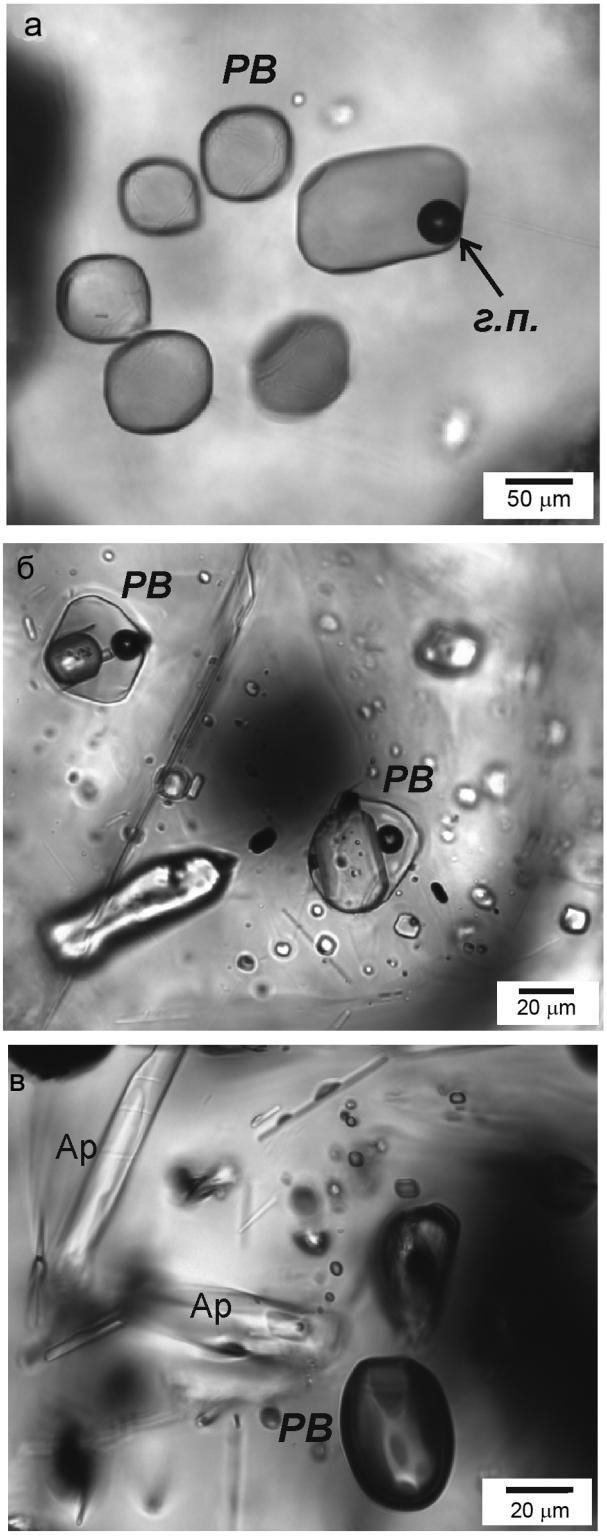

Рис. 6. Расплавные включения во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

а – зональные РВ в кварце, относящиеся к 1 (РВ I) и 2 (РВ II) типам (р2-9-13), б – РВ 3 типа (РВ III) в плагиоклазе (р2-9-13), содержащие захваченные кристаллы пироксена, в – РВ 1 типа в клинопироксене (р-32-6).

в ФВ второго типа варьируют в некоторых пределах, но газовая фаза во всех включениях преобладает над жидкой.

К третьему типу ФВ отнесены двухфазовые включения, содержащие при комнатной температуре газ и стекло (рис. 7 а, ФВ III). В отличие от РВ второго типа, в этих преобладает фаза газообразной CO_2.

ФВ приурочены к ядерным и промежуточным зонам роста вкрапленников плагиоклаза (рис. 7 в, г, зона I) и образуют единые группы с РВ (рис. 7 г). Зоны роста, содержащие ФВ, характеризуются максимальными содержаниями CaO (An_{60-80}). РВ 2 типа и ФВ 3 типа в таких группах характеризуются различными объемными соотношениями газовой и стекловатой фаз. Это означает, что они являются результатом захвата сосуществующих силикатного расплава и водно-углекислотного флюида. Внешние зоны вкрапленников плагиоклаза, время образования которых наиболее близко ко времени извержения, либо не содержат включений, либо содержат только РВ (рис. 7 в, г, зона II).

СОСТАВЫ РАСПЛАВНЫХ И ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Составы стекол расплавных включений приведены в табл. 5 и на рис. 8–9. По соотношению кремнезема и щелочей стекла РВ из пемз ПВ попадают в поле риолитов и дацитов нормального ряда. От валовых составов пород стекла РВ отличаются более высокими содержаниями SiO_2, но практически не отличаются по содержаниям щелочей. Следует заметить, что составы включений из разных минералов образуют компактное поле точек. Поля составов стекол РВ ЛП и ПВ мало отличаются друг от друга. Стекла РВ из пемз ЛП имеют более узкий диапазон вариаций SiO_2. По этой причине они практически полностью находятся в поле риолитов (рис. 8 а). По соотношению Na_2O и K_2O стекла РВ находятся в полях низко- и умеренно калиевых составов (рис. 8 б). По соотношению щелочей и глинозема являются высокоглиноземистыми (рис. 8 в). По нормативным содержаниям полевых шпатов стекла РВ обоих вулканических центров попадают в поле трондьемитов (рис. 8 г).

По данным изучения составов РВ методом ЭДС было установлено наличие Cl, содержания которого составляют 0.2–0.4 мас. % для обоих проявлений (табл. 6). Методом ВДС определено, что РВ во вкрапленниках ЛП содержат 0.036–0.051 мас. %, а во вкрапленниках ПВ – 0.012–0.029 мас. % P_2O_5. Содержания фтора и серы, по данным исследования методом ВДС, оказались менее 0.1 мас. % F и менее 0.021 мас. % SO_3, что является пределом определения при выбранных параметрах анализа.

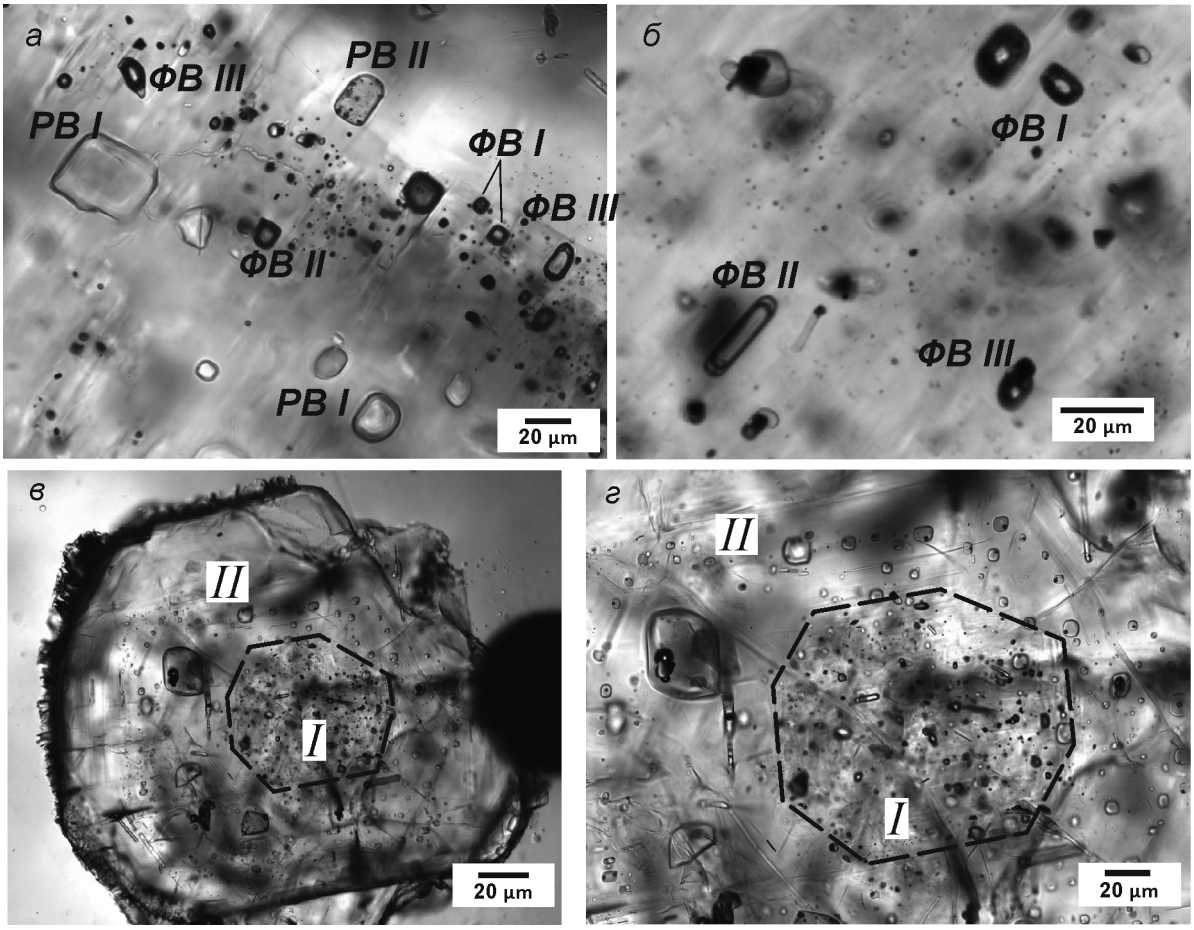

Рис. 7. Флюидные включения в плагиоклазе из пемз перешейка Ветрового.

а – расплавные и флюидные включения разных типов в промежуточной зоне вкрапленника плагиоклаза (р-32-48); б – флюидные включения различных типов в ядерной части вкрапленника (ИТ-15-51); в, г – зональный вкрапленник плагиоклаза с ядром, содержащим сингенетичные расплавные и флюидные включения (зона I), внешняя зона этого вкрапленника (зона II) не содержит флюидных включений (р-32-36). ФВ I, ФВ II и ФВ III – флюидные включения 1, 2 и 3 типов, соответственно.

Так как изученные РВ не подвергались гомогенизации, необходимо установить насколько их составы изменились после захвата за счет отложения на стенки включения вещества, родственного минералу-хозяину. На рис. 9 приведены составы стекол РВ в координатах $CaO–Al_2O_3$ и $FeO–Al_2O_3$. Отложение вещества, родственного минералу-хозяину, приведет к смещению состава захваченного расплава в направлении стрелок на рис. 9а. Однако на рис. 9б и 9в видно, что во всех РВ, независимо от состава минерала-хозяина, содержания глинозема снижаются по мере уменьшения содержания CaO. Такой тренд может определяться только осаждением плагиоклаза. Так как РВ во всех вкрапленниках подчиняются этой закономерности, можно считать, что указанная закономерность является следствием кристаллизационной дифференциации расплава в очаге, а осаждение вещества минерала-хозяина на стенки включений после захвата существенного влияния на их составы не оказало. Косвенным подтверждением этого тезиса является то, что составы стекла основной массы пемз ПВ, приведенные в табл. 6, попадают в поле составов РВ и соответствуют той же закономерности изменения составов, что и РВ. Это означает, что включения были захвачены непосредственно перед извержением и, вероятно, были закалены непосредственно в его ходе. Таким образом, составы изученных РВ характеризуют расплав вулканического очага непосредственно перед извержением.

Необходимо подчеркнуть, что составы стекол РВ в ядерных и краевых зонах роста темноцветных минералов аналогичны РВ в плагиоклазе и кварце. Это, учитывая вышесказанное о соответствии их составу материнского расплава, предполагает, что образование ассоциации темноцветных минералов, равно как и основного плагиоклаза, связано с появлением и

Таблица 5. Средние анализы стекол природно закаленных расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветрового.

Минерал хозяин	Львиная Пасть					Перешеек Ветровой			
	OPx	CPx	Pl	Amp	Qu	OPx	CPx	Pl	Qu
	n(14)	n(1)	n(33)	n(4)	n(9)	n(6)	n(3)	n(17)	n(2)
SiO_2	72.83 ± 0.58	72.48	74.48 ± 1.09	73.96 ± 0.96	74.79 ± 1.17	74.27 ± 1.01	73.64 ± 0.25	73.58 ± 1.36	74.09
TiO_2	0.25 ± 0.03	0.22	0.28 ± 0.04	0.28 ± 0.02	0.24 ± 0.04	0.34 ± 0.08	0.34 ± 0.03	0.33 ± 0.06	0.32
Al_2O_3	11.66 ± 0.18	11.83	11.44 ± 0.39	11.41 ± 0.61	11.16 ± 0.38	11.56 ± 0.37	11.05 ± 0.11	11.34 ± 0.29	10.90
FeO	1.95 ± 0.13	1.74	1.54 ± 0.16	1.73 ± 0.12	1.31 ± 0.16	2.17 ± 0.10	1.74 ± 0.1	1.70 ± 0.14	1.47
MgO	0.29 ± 0.11	0.30	0.32 ± 0.05	0.29 ± 0.05	0.29 ± 0.03	0.25 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.33 ± 0.05	0.30
CaO	1.79 ± 0.12	1.85	1.64 ± 0.19	1.56 ± 0.24	1.52 ± 0.24	1.77 ± 0.17	1.50 ± 0.02	1.66 ± 0.14	1.45
Na_2O	3.54 ± 0.38	3.01	3.43 ± 0.36	3.79 ± 0.40	3.81 ± 0.23	2.95 ± 0.56	3.17 ± 0.5	3.29 ± 0.24	4.14
K_2O	1.58 ± 0.20	1.43	1.75 ± 0.33	1.77 ± 0.18	1.68 ± 0.13	1.18 ± 0.38	1.60 ± 0.09	1.60 ± 0.06	1.59
P_2O_5*	0.021 ± 0.005	но	0.024± 0.005	но	0.018 ± 0.005	0.026 ± 0.004	0.027 ± 0.006	0.021 ± 0.003	0.020 ± 0.006
	n(4)		n(4)		n(4)	n(8)	n(8)	n(6)	n(5)
SO_3*	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021
Cl	0.24 ± 0.01	0.23	0.27 ± 0.04	0.26 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.23 ± 0.04	0.25 ± 0.02	0.29 ± 0.04	0.26
F*	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Сумма	94.18	93.08	95.19	95.12	95.09	94.82	93.55	94.12	94.52

эволюцией риолитового расплава и не предполагает участие других расплавов более основного состава.

Методом рамановской спектроскопии было установлено, что стекла всех включений содержат H_2O. Методика проведенных анализов позволяет оценить содержание воды по недостатку суммы микрозондовых анализов с учетом данных ВДС о возможных содержаниях серы и фтора (табл. 5). Учитывая грубость такой оценки, можно отметить, что стекла РВ содержат около 3.8–6.3 мас. % H_2O.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Минеральные парагенезисы. Анализ взаимоотношений главных минералов вкрапленников и включений в них позволяет рассмотреть последовательность их образования при кристаллизации магматического расплава в камере перед извержением. В виде обособленных кристаллов в пемзах обоих проявлений встречаются гиперстен, авгит, плагиоклаз, кварц, ильменит и магнетит. В пемзах Львиной Пасти помимо этих минералов присутствует железистый гастингсит.

В качестве включений в пироксенах присутствуют практически все минералы за исключением кварца. Они образуют сростки с плагиоклазом, ильменитом и магнетитом. Кварц, напротив, не содержит кристаллических включений и не образует сростков с

Таблица 6. Средние составы стекол основной массы пемз перешейка Ветрового.

	1	2	3	4
	n(3)	n(3)	n(3)	n(3)
SiO_2	76.77	76.01	77.36	72.67
TiO_2	0.31	0.30	0.33	0.33
Al_2O_3	11.42	11.49	11.71	11.01
FeO	1.92	2.29	1.92	1.69
MnO	0.04	0.08	нпо	нпо
MgO	0.27	0.48	0.28	0.23
CaO	1.62	1.54	2.03	1.48
Na_2O	3.15	3.59	3.79	3.12
K_2O	1.61	1.61	1.63	1.52
Cl	0.28	0.29	0.31	0.24
Сумма	97.40	97.67	99.54	92.27

Примечание к таблице 5. Анализы, помеченные * – выполнены методом ВДС рентгеноспектрального микроанализа, остальные – методом ЭДС; для результатов метода ВДС количество анализов указано отдельно; но – не определялось, n – количество анализов.

Примечание к таблице 6. Анализы выполнены методом ЭДС, содержания P_2O_5. SO_3 и F – ниже предела обнаружения, n – количествово анализов, нпо – ниже предела обнаружения.

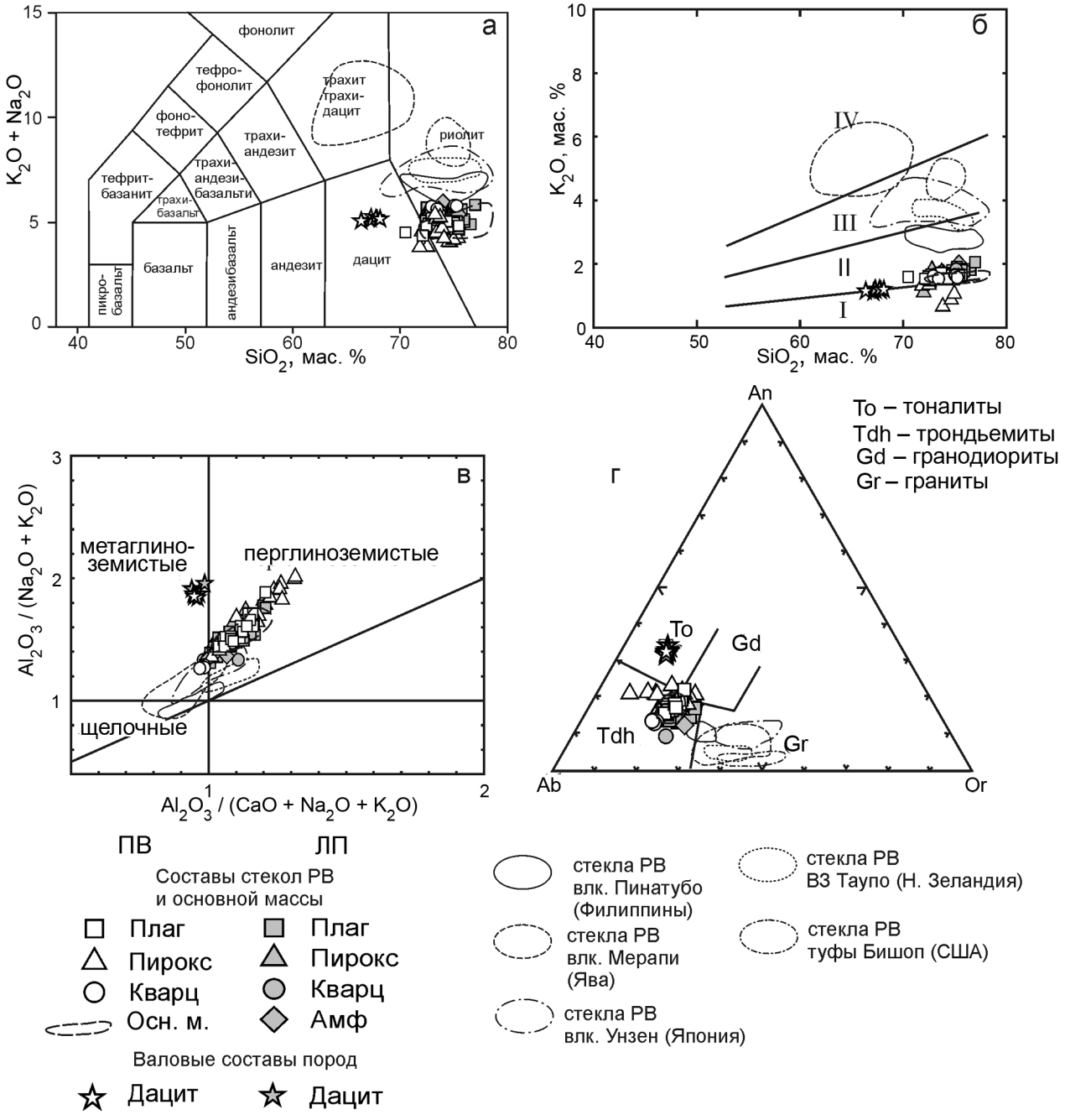

Рис. 8. Положение валовых составов дацитов, стекол РВ и основной массы на классификационных диаграммах кислых пород в сравнении с составами кислых пород зон субдукции различных регионов мира по данным [21–23, 33].

Римскими цифрами на диаграмме обозначены поля кислых пород: I – низкокалиевых, II – умереннокалиевых, III – высококалиевых и IV – ультракалиевых.

плагиоклазом и темноцветными минералами. Включения апатита установлены во всех минералах за исключением кварца.

Такие соотношения позволяют предположить, что авгит, гиперстен, плагиоклаз, магнетит, ильменит и апатит в камерах ЛП и ПВ образовывались практически одновременно, захватывая друг друга в виде включений и образуя сростки. Образование амфибола из пемз ЛП происходило совместно с магнетитом, апатитом и плагиоклазом, которые установлены в виде включений в нем, и с гиперстеном, который содержит включение амфибола. На этом основании можно сде-

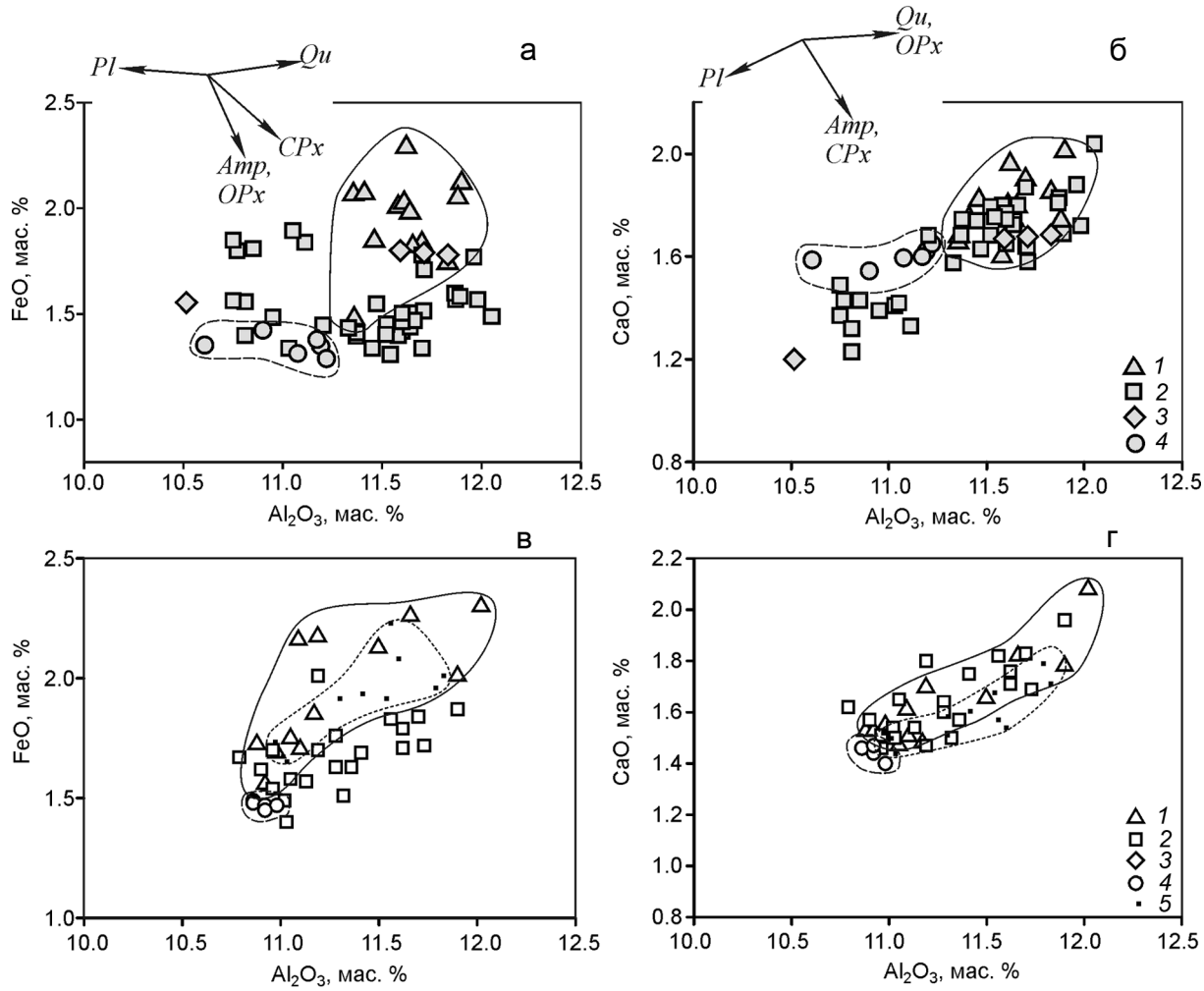

Рис. 9. Вариации составов стекол расплавных включений (РВ) и основной массы для кальдеры Львиная Пасть (а-б) и перешейка Ветрового (в-г). Пояснения в тексте.

Ссоставы РВ: *1* – в пироксенах, *2* – в плагиоклазе, *3* – в амфиболе, *4* – в кварце, *4* – составы стекол основной массы пемз перешейка Ветрового. Контурами выделены: сплошная линия – составы РВ в пироксенах, пунктир – составы РВ в кварце, точечный пунктир – составы стекла основной массы.

лать заключение, что амфибол ЛП также образовался одновременно с пироксенами, плагиоклазом, магнетитом, ильменитом и апатитом. Отсутствие зональности в фемических минералах (пироксены и амфибол) предполагает, что их кристаллизация не сопровождалась значительными изменениями состава материнского расплава. Это подтверждается данными по составам стекол РВ в различных зонах этих минералов.

Важно отметить, что плагиоклаз в отличие от темноцветов содержит меньше минеральных включений. Ядерные зоны кристаллов плагиоклаза с An 40–50 содержат обильные включения темноцветных и рудных минералов. Их количество существенно уменьшается в промежуточных зонах с An 60–80. Внешние зоны плагиоклазов с An 40–50 содержат редкие включения апатита, либо не содержат кристаллических включений совсем. В изученных образцах часто находились вкрапленники плагиоклаза, не содержащие минеральных включений, подобно кварцу. Из этого следует, что плагиоклаз, вероятно, кристаллизовался дольше темноцветных минералов. Не исключено, что часть вкрапленников плагиоклаза возникла одновременно с кварцем. Отсутствие сростков и минеральных включений в кварце позволяет предположить, что он образовался несколько позже рассмотренной выше ассоциации.

Несмотря на очевидные признаки различия по времени образования, составы расплавных включений во всех минералах отличаются очень мало. Закономерные изменения, наблюдаемые в составах стекол

РВ, можно объяснить кристаллизацией из расплава плагиоклаза и, возможно, кварца, так как поля составов включений в координатах $CaO–Al_2O_3$ вытянуты в сторону составов плагиоклаза. Такой тенденции не заметно в координатах $FeO–Al_2O_3$. Следовательно, кристаллизация фемических минералов не влияла существенным образом на состав расплава.

Приведенные данные позволяют сделать заключение о том, что ассоциация вкрапленников сложена двумя комплексами минералов. Первый представляет собой ассоциацию гиперстен+авгит+плагиоклаз, к которой в пемзах ЛП присоединяется амфибол. Второй составлен плагиоклазом и кварцем, которые, вероятно образуются несколько позже первого комплекса.

Обычно образование темноцветных минералов связывают с кристаллизацией более основных и, соответственно, более высокотемпературных порций расплава. Наиболее кислые расплавы рассматриваются как результат кристаллизационной дифференциации этих порций. Эксперименты по плавлению и кристаллизации дацитов показывают, что плагиоклаз, орто- и клинопироксен являются ликвидусными фазами при температурах 900–1000°С и давлениях 1–3 кбар, в то время как кварц начинает кристаллизоваться при более низких температурах [16, 23, 30, 31]. При этом появление клинопироксена отмечается редко. Амфибол при кристаллизации образуется при повышенных содержаниях воды (более 4–5 мас. %), замещая орто- или/и клинопироксен с плагиоклазом. Исследования процессов кристаллизации дацитов вулкана Пинатубо (Филиппины, извержение 1991 года) [31] показали, что поле стабильности амфибола расширяется по температуре от 760 (солидус) до 900°С при увеличении содержания воды от 4 до 5.8 мас. %. Результаты аналогичного исследования по дацитам вулкана Унзен (Япония, извержение 1991 года) свидетельствуют, что при содержаниях воды, превышающих 5.5 мас. %, амфибол в равновесии с ортопироксеном становится стабильным во всем температурном интервале экспериментов [23]. Однако ни в одном из перечисленных экспериментальных исследований амфибол не ассоциировал одновременно с орто- и клинопироксеном.

Присутствие амфибола является главным отличием первого комплекса минералов вкрапленников ЛП от ПВ. Оценка содержания воды по недостатку суммы анализов стекол РВ из обоих проявлений (табл. 5 и 6) показывает, что они отличаются мало и уровень ее содержания близок к тому, который стабилизирует амфибол (5–6 мас. %). Таким образом, отсутствие амфибола в ассоциации ПВ нельзя объяснить меньшим, чем для ЛП содержанием воды.

Сходство составов расплавов, захваченных минералами обоих комплексов, и отсутствие зональности темноцветов дают основание рассматривать эти минералы как продукт реакции плавления, в которой два пироксена и плагиоклаз представляют продукт перитектической реакции, ассоциирующий с риолитовым расплавом. Такие фазовые ассоциации были получены в экспериментах по плавлению зеленых сланцев, по составу отвечающих андезибазальтам при давлениях 1–7 кбар [12]. Реститовая ассоциация два пироксена+плагиоклаз ($An_{27–85}$) в равновесии с кислым (SiO_2 70–76 мас. %) расплавом была получена в экспериментах по дегидратационному и водонасыщенному плавлению (< 30 % расплава) при давлении 1 кбар в диапазоне 900–1000°С. Авторы особо отмечают, что амфибол вероятнее всего не является реститовой фазой, а также возникает в результате кристаллизации водосодержащего расплава. При этом не имеет значения, является этот расплав результатом водонасыщенного или дегидратационного плавления. Однако для его кристаллизации требуются давления, превышающие 1 кбар [12, 16].

Принимая во внимание, что ядерные и краевые зоны темноцветов содержат РВ, не различающиеся принципиально по содержаниям Mg и Fe, а также высокие Mg# пироксенов, не характерные для кислых пород, можно заключить, что образование пироксенов и амфибола связано со сбросом избыточных Fe и Mg, не способных раствориться в образующемся кислом расплаве. Окислительные обстановки способствовали связыванию железа в магнетит и ильменит, что способствовало образованию высоко Mg темноцветов.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод о том, что ассоциации вкрапленников пемз ПВ и ЛП содержат в себе набор перитектических минералов (гиперстен, авгит и плагиоклаз), возникших в результате плавления метабазитовой коры острова Итуруп, и новообразованных продуктов кристаллизации кислого расплава – кварца и плагиоклаза. Вероятно, кристаллизация очага кислой магмы кальдеры ЛП происходила в условиях давлений, превышающих 1 кбар. Это обусловило наличие амфибола в ассоциации вкрапленников. Образование вкрапленников в очаге, породившем пемзовые отложения ПВ, вероятно, происходило при давлениях ≤ 1 кбар.

Составы расплавов. Сравнение составов РВ в минералах пемз ЛП и ПВ с включениями во вкрапленниках продуктов других масштабных извержений кислой магмы (рис. 8) показывает, что расплавы извержений острова Итуруп отличаются пониженным содержанием калия и более высокой глиноземистостью. Составы кислых расплавов, участвовавших в извержениях вулканов Мерапи (о-в Ява), Пинатубо (Филиппины), Унзен (Япония), Санторин (Греция) и вулканической зоны Таупо (Новая Зеландия), попада-

ют в поле гранитов, и считается, что возникновение таких расплавов связано с дифференциацией более основных магм, состав которых мог варьировать от базальтов до андезитов [17, 19, 20, 33].

РВ в минералах пемз ЛП и ПВ имеют состав, типичный для тоналит-трондьемитовой серии, и отвечают низко-среднекалиевым высокоглиноземистым плагиогранитам. Выше уже было показано, что характер ассоциаций минералов порфировых вкрапленников и их соотношение с составами РВ свидетельствуют, что такие расплавы являются продуктами частичного плавления метабазитового субстрата, а не продуктами дифференциации более основной магмы.

Низкие содержания Ca, Fe и Mg в стеклах РВ подтверждают, что пироксены и частично плагиоклаз являются продуктами реакции, возникшими при образовании кислого расплава. Общая для включений в плагиоклазе и пироксенах положительная корреляция CaO и Al_2O_3 показывает, что расплавы перед извержением претерпели дифференциацию. Несмотря на то, что разброс составов небольшой, очевидно, что в целом включения в пироксенах обладают менее дифференцированными составами по сравнению с включениями в кварце. Малые диапазоны вариаций составов означают, что расплавы от момента появления до извержения претерпели крайне незначительные изменения в составе, обусловленные, главным образом, кристаллизацией плагиоклаза. Вариации составов РВ в плагиоклазе охватывают весь диапазон РВ в других минералах, что подтверждает сквозной характер его кристаллизации при эволюции очагов кислой магмы ЛП и ПВ.

Дегазация расплавов. Дегазация магматических расплавов – это процесс, определяющий как стили извержений, так и флюидный режим самого очага и вмещающих его комплексов. Дегазация также играет важную роль в формировании приповерхностных термальных систем, ассоциирующих с вулканическими центрами. Плинианский тип извержений, в результате которых возникли пемзовые толщи ЛП и ПВ, обычно связывают с очагами кислой флюидонасыщенной магмы [13, 14]. В процитированных работах показано, что расплав, предшествовавший плинианскому извержению вулкана Пинатубо в 1991 году, находился в равновесии с флюидом состава H_2O-CO_2-S, при концентрации воды в расплаве около 7 мас. %.

Дегазация расплава может быть установлена (1) по появлению флюидных включений в одних ассоциациях с расплавными, (2) по снижению содержаний летучих компонентов в РВ из разных генераций, (3) по разнице в их содержании между стеклами РВ и стеклом основной массы. Наличие флюидных углекислотных и водно-углекислотных включений в ассоциации с РВ было установлено для вкрапленников плагиоклаза из пемз ПВ. Основываясь на характере распределения ассоциаций ФВ и РВ, эта дегазация происходила на ранних стадиях кристаллизации и сопровождалась выделением газообразного водно-углекислотного флюида. Вкрапленники кварца не содержат флюидных включений, что может быть связано с тем, что образование этого минерала произошло из дегазированного расплава. Однако сопоставление оценок содержания воды РВ в пироксенах и кварце по разнице суммы микрозондовых анализов (табл. 5) не дает основания считать, что вся вода выделилась в ходе ранней дегазации. Растворимость воды в риолитовых расплавах при 2 кбар и 800°C может достигать 6 мас. % [21, 22, 32]. Присутствие CO_2 снижает концентрацию насыщения воды при этих параметрах до ~ 3.5 мас. % при X_{H2O} во флюиде 0.5 [32].

Для стекол основной массы ПВ характерны более низкие оценочные содержания воды (0–3 мас. %) (табл. 6), чем для включений в кварце (~ 6 мас. %) (табл. 5). Эти данные позволяют предположить, что, несмотря на раннюю дегазацию, достаточно интенсивное выделение воды происходило и в процессе извержения.

Флюидный режим при образовании вкрапленников пемз ЛП был иным. Флюидные включения в них отсутствуют, свидетельствуя о том, что дегазация в ходе кристаллизации не проявлялась. Наличие амфибола позволяет считать, что кристаллизация происходила при давлениях, превышающих 1 кбар. Уровень содержаний воды (5–7 мас. %) (табл. 5) во включениях подобен таковому в расплавах ПВ и не менялся существенно в процессе кристаллизации.

Содержание серы в РВ обоих проявлений не превышало предела обнаружения при выбранных параметрах рентгеноспектрального анализа, который составил 126 г/т. Однако о присутствии в расплаве серы при образовании раннего комплекса минералов свидетельствуют устойчиво высокие содержания серы в апатите (до 0.8-0.9 мас. %) (табл. 5) и стабильное наличие включений сульфидов в темноцветах, магнетите и ильмените. То же самое можно сказать и о присутствии в составе летучих компонентов расплава фтора, содержание которого составляет 1.86–2.25 мас. % в апатите ЛП и 2.11–3.00 мас. % в апатите из пемз ПВ. Оценка содержаний этих элементов по коэффициентам распределения между кислым расплавом и апатитом [29, 34] дает оценку содержания SO_3 – 0.1 и F – 0.2 мас. %, что существенно больше, чем реально измерено в расплаве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кальдерные извержения залива Львиная Пасть и перешейка Ветрового на острове Итуруп имеют сходные черты и являются результатом эволюции расплавов кислого состава, возникших в результате плавления метабазитов коры под островом Итуруп. Минералотермометрические исследования показали, что кристаллизация расплава происходила при температурах, близких к 800°С. Образование вкрапленников пемз ПВ шло при давлениях ≤ 1 кбар, в то время как вкрапленники ЛП кристаллизовались при более высоких давлениях. Вкрапленники разделяются на две ассоциации. Первая представляет собой продукты реакции плавления (перитектические минералы), состоящие из двух пироксенов и плагиоклаза с второстепенным апатитом, и, вероятно, оксидами Fe и Ti. Вторая сложена новообразованными плагиоклазом и кварцем. Первые результаты исследования РВ показали, что расплавы кислых магм обоих проявлений отвечают низко-умереннокалиевым высокоглиноземистым плагиогранитам и, вероятно, не претерпели существенной кристаллизационной дифференциации перед извержением. Главными летучими компонентами магм являются H_2O, CO_2, S, F и Cl. Дегазация с выделением водно-углекислотного флюида сопровождала раннюю кристаллизацию плагиоклаза из пемз ПВ. Признаков дегазации расплавов ЛП до извержения установить не удалось. Сопоставляя данные, полученные по обоим вулканическим центрам, можно сделать заключение, что выделение воды может быть сопряжено как с ранней дегазацией расплава (ПВ), так и с самим извержением (ПВ, ЛП).

Вероятной причиной возникновения крупных очагов кислой магмы может быть внедрение значительных порций расплавов базальтового состава [15]. Возникшие таким образом кислые расплавы являются концентраторами воды и других летучих, выделяющихся при контактовом метаморфизме и дегазации очага основной магмы. Накопление летучих, в особенности воды, служит основным фактором, определяющим степень эксплозивности извержений. Отсутствие явных признаков дифференциации и смешения расплавов говорит об относительно небольшом промежутке времени между возникновением очагов кислой магмы ПВ и ЛП и извержениями.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.г.-м.н., профессору А.Э. Изоху и д.г.-м.н. Ю.А. Мартынову за содержательные рецензии и замечания, которые позволили улучшить качество изложения материалов статьи. Высокое качество микроанализов, выполненных рентгено-спектральными методами, обеспечено благодаря помощи к.г.-м.н. Н.С. Карманова и к.г.-м.н. В.Н. Королюка (ИГМ СО РАН). Исследование расплавных и флюидных включений для данной статьи выполнено при поддержке гранта РФФИ 16-05-00894 (КДВ), валовый состав образцов пирокластики (петрогенные оксиды и микроэлементы) изучен благодаря поддержке гранта ДВО РАН 15-I-2-101.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.И. Сейсмоакустические исследования кальдеры Львиная пасть // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 44–53.
2. Булгаков Р.Ф. История развития южных островов Большой Курильской дуги в плейстоцене: Автореф. дис…. канд. геол.-минер. наук. М., 1994. 20 с.
3. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
4. Грабков В.К. Новые данные о геологическом строении о. Итуруп // Докл. АН СССР. 1973. Т. 212, № 6. С. 1409. 1412.
5. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Арсланов Х.А. и др. Кальдерообразующее извержение Львиной Пасти (о. Итуруп, Курильские острова): стратиграфия и возраст: Материалы VII Сибирской науч.-практ. конф. молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск: ИГиМ СО РАН им. В.С. Соболева, 2014. С. 14–15.
6. Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 204 с.
7. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатской области в конце плейстоцена-начале голоцена // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 1. С. 175–181.
8. Новейший и современный вулканизм на территории России: [кол. моногр.: науч. издание] / Отв. ред. и автор вступ. ст. Н. П. Лаверов; Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта ; худож. Ю. И. Духовская. М.: Наука, 2005. 604 с.
9. Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 230 с.
10. Рыбин А.В. Неоген-четвертичный кислый вулканизм Курильской островной дуги: Автореф. дис…. канд. геол.-минер. наук. Южно-Сахалинск, 1997. 24 с.
11. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.
12. Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites // J. Petrol. 1991. V. 32, Part. 2. P. 365–401.
13. Borisova A.Y., Pichavant M., Beny J.-M. et al. Constraints on dacite magma degassing and regime of the June 15, 1991, climactic eruption of Mount Pinatubo (Philippines): New data on melt and crystal inclusions in quartz // J. Volcanol. & Geotherm. Res. 2005. V. 145, Iss. 1–2. P. 35–67.
14. Borisova A.Y., Toutain J.-P., Dubessy J. et al. H2O-CO2-S fluid triggering the 1991 Mount Pinatubo climactic eruption (Philippines) // Bull. Volcanol. 2014. V. 76, Iss. 2, Art. #800.
15. Bryan S.E., Peate I.U., Peate D.W. et al. The largest volcanic eruptions on Earth // Earth-Sci.e Rev. 2010. V. 102. P. 207–229.
16. Cadoux A., Scaillet B., Druitt T.H., Deloule E. Magma storage

conditions of large Plinian eruptions of Santorini volcano (Greece) // J. Petrol. 2014. V. 55, Iss. 6. P. 1129–1171.
17. Deering C.D., Bachmann O., Dufek J., Gravley D.M. Rift-related transition from andesite to rhyolite volcanism in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand) controlled by crystal-melt dynamics in mush zones with variable mineral assemblages // J. Petrol. 2011. V. 52, Iss. 11. P. 2243–2263.
18. Druitt T.H. New insights into the initiation and venting of the Bronze-Age eruption of Santorini (Greece), from component analysis // Bull. Volcanol. 2014. V. 76. P. 794.
19. Gelman S.E., Deering C.D., Gutierrez F.J., Bachmann O. Evolution of the Taupo Volcanic Center, New Zealand: petrological and thermal constraints from the Omega dacite // Contr. Mineral. & Petrol. 2013. V. 166, Iss. 5. P. 1355–1374.
20. Gertisser R., Preece K., Keller J. The Plinian Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece: Magma evolution and volatile behaviour // J. Volcanol. & Geotherm. Res. 2009. V. 186, Iss. 3–4, P. 387–406.
21. Holtz F., Behrens H., Dingwel D. B., Johannes W. H_2O solubility in haplogranitic melts: Compositional, pressure and temperature dependence // Amer. Miner., 1995. V. 80. P. 94–108.
22. Holtz F., Johannes W., Tamic N., Behrens H. Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: an evaluation and implications // Lithos. 2001. V. 56. P. 1–14.
23. Holtz F., Sato H., Lewis J. et al. Experimental petrology of the 1991–1995 Unzen dacite, Japan. P. I: Phase relations, phase composition and pre-eruptive conditions // J. Petrol. 2005. V. 46, Iss. 2. P. 319–337.
24. Jarosewich E. J., Nelen J. A., Norberg J. A. Reference samples for electron microprobe analyses // Geostandards Newsletter, J. Geostandards and Geoanalysis. 1980. V. 4. P. 43–47.
25. Lindsley D.H. Pyroxene thermometry // Am. Mineral. 1983. V. 68. P. 477–493.
26. Lineweaver J.L. Oxygen outgassing caused by the electron bombardment of glass // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 1786–1791.
27. Morgan G. B., London D. Optimizing of electron microprobe analysis of hydrous alkali glasses // Am. Mineral. 1996. V. 81. P. 1176–1185.
28. Morgan G. B., London D. Effect of current density on the electron microprobe analysis of alkali aluminosilicate glasses // Am. Mineral.. 2005. V. 90. P. 1131–1138.
29. Parat F., Holtz F. Sulfur partitioning between apatite and melt and effect of sulfur on apatite solubility at oxidizing conditions // Contrib. Mineral. Petrol. 2004. V. 147. P. 201–212.
30. Riker J.M., Blundy J.D., Rust A.C. et al. Experimental phase equilibria of a Mount St. Helens rhyodacite: a framework for interpreting crystallization paths in degassing silicic magmas // Contr. Mineral. & Petrol. 2015. V. 170, Iss. 1. Art. #6.
31. Scailet B., Evans B. W. The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P–T–fO2–fH2O conditions of the dacite magma // J. Petrol. 1999. V. 40, Iss. 3. P. 381–411.
32. Tamic N., Behrens H., Holtz F. The solubility of H2O and CO2 in rhyolitic melts in equilibrium with a mixed CO_2–H_2O fluid phase // Chem. Geol. 2001. V. 174. P. 333–347.
33. Van Hoose A.E., Streck M.J., Pallister J.S., Waelle M. Sulfur evolution of the 1991 Pinatubo magmas based on apatite // J. Volcanol. & Geotherm. Res. 2013. V. 257. P. 72–89.
34. Webster J.D., Tappen C.M., Mandeville C.W. Partitioning behavior of chlorine and fluorine in the system apatite-melt-fluid. II: Felsic silicate systems at 200 MPa // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73, Iss. 3. P. 559–581.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

S.Z Smirnov, A.V. Rybin, E.N. Sokolova, D.V. Kuzmin, A.V. Degterev, T.Yu. Timina

Acid magmas of the caldera-forming eruptions in Iturup Island: the first results of studies of the melt inclusions in phenocrysts pumice of Lvinaya Past and Vetrovoy Peresheyek calderas

The paper presents the first results of the petrological studies of the siliceous pyroclastics magmatic melts associated with large-scale eruptions of on the Iturup Island. It is shown that the caldera-forming eruptions of the Lvinaya Past and the Peresheyek Vetrovoy have similar features and are the result of the evolution of silicic melts originated from partial melting of metabasites. Mineralothermometry revealed that the melt crystallization occurred at the temperatures of ~ 800° C. The phenocrysts from pumices of the Peresheek Vetrovoy crystallized at pressures of ≤ 1 kb, while those from Lvinaya Past were formed at higher pressures.
The compositions of pyroclastics of both calderas belong to moderately aluminous dacites and rhyolitic dacites of the normal series and probably did not undergone considerable crystallization differentiation before the eruptions. The main volatile components of magma are H_2O, CO_2, S, F and Cl. Degassing with emission of water – carbon dioxide fluid accompanied the early crystallization of plagioclase of Peresheek Vetrovoy pumice. Evidences of pre-eruption melt degassing in Lvinaya Past have not been found. Water release from melts can be associated both with early magma degassing and with the eruptions. The absence of evidences of deep differentiation and mixing of contrasting melts implies a relatively small time span between the acid melt appearance and eruptions.

Key words: **calderas, caldera-forming eruptions, pyroclastic rocks, pumice, melt inclusions, volatiles, acid melts, degassing, metabasites, melting, Iturup Island.**