

УДК 551.211

© 1993 г. Е.Н. ГРИБ, В.Л. ЛЕОНОВ

**ИГНИМБРИТЫ УЗОН-ГЕЙЗЕРНОЙ
ВУЛКАНОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕПРЕССИИ,
КАМЧАТКА: СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗРЕЗОВ,
СОСТАВ, УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ**

Игнимбриды Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии образуют два обширных поля (Северное и Южное). Площадь распространения их составляет ~ 1700 км², объем — 20—25 км³. Игнимбриды Южного поля связаны с формированием западной части депрессии — кальдеры Узон, игнимбриды Северного поля связаны с восточной частью депрессии — кальдерой Долины гейзеров. Близкий состав минеральных фаз игнимбридов каждого поля и различия их между собой свидетельствуют об относительно однородном составе игнимбридообразующего расплава в каждом случае, но о разных условиях его кристаллизации. Последние определяются, очевидно, глубиной кровли корового очага (или системы очагов) и положением его (их) относительно осевой зоны регионального магноподводящего разлома Восточной Камчатки. Андезитодацитовый состав агглютинатов заключительной стадии кальдерообразующего извержения, находки среди их прослоев гетеротакситовых пемз свидетельствуют о зональном строении корового резервуара. Ниже верхней кислой (риодацитовой) зоны, возможно, присутствовали расплавы более основного (дацитового, андезитового) состава.

IGNIMBRITES FROM THE UZON- GEYSERNAYA VOLCANO-TECTONIC DEPRESSION, KAMCHATKA: COMPARISON OF SECTIONS, COMPOSITION AND CONDITIONS OF FORMATION, by G r i b E.N. and L e o n o v V.L. Ignimbrites from the Uzon-Geysernaya volcano-tectonic depression form two large fields (north and south). The area of their distribution is about 1700 km², the volume is 20—25 km³. Ignimbrites from the south field are associated with the formation of the western part of the depression, namely the Uzon Caldera. Ignimbrites from the north field are associated with the eastern part of the depression, namely the Caldera of the Geyser Valley. Similar composition of ignimbrite mineral phases in each field and the difference between them indicate that the composition of ignimbrite-forming melt in each case is relatively homogeneous, but the conditions of its crystallization are different. The later are likely dependent on the depth of the roof of the crustal chamber (or chamber system) and its (their) position relatively the axial zone of the East Kamchatka regional magma-supplying fault. The andesite-dacite composition of agglutinates at the final stage of caldera-forming eruption and findings among them of heterotaxitic pumice interlayers point to the zonal structure of the crustal reservoir. Melts of more basic (dacite, andesite) composition might be present below the upper acid (rhyodacitic) zone.

(Received December 4, 1992)

Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Особое место среди магматических процессов островных дуг на орогенной стадии их развития занимает кислый вулканизм и сопряженный с ним процесс игнимбриобразования. Катастрофические извержения больших объемов пирокластического материала связаны с формированием кислых магматических резервуаров и образованием вулканотектонических депрессий.

В настоящей статье рассматривается состав и строение верхнеплейстоценовых игнимбритов, связанных с Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессией. Следует отметить, что термин «игнимбрит» мы употребляем здесь в широком смысле, для характеристики комплекса пород, объединенных общим генезисом. В их разрезах могут встречаться как собственно игнимбриты, так и рыхлые пемзовые отложения и плотные сильно спекшиеся туфы лавоподобного облика. Описание отдельных разрезов игнимбритов этого района, выделение остывших единиц и некоторые вопросы генезиса приводились в работах предыдущих исследователей [2, 3, 8—10]. В последние годы получено большое количество нового материала, дополнившего наши представления о распространении, составе и условиях формирования игнимбритов.

Описание разрезов игнимбритов

Игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией, образуют два обширных поля — Северное и Южное (рис. 1). Северное простирается от границ депрессии к северу и северо-западу на расстояние до 40 км и достигает берегов Кроноцкого озера. Южное поле расчленяется на несколько рукавов, которые по притокам р. Верхний Стан скатились в верховья рек Левая и Правая Жупановы и достигли долины р. Новый Семячик, удаляясь при этом от кальдеры на расстояние до 60 км. Обширный поток затек в кальдеру вулкана Большой Семячик, заполнив верхнюю часть долины р. Старый Семячик. Площадь распространения игнимбритов, связанных с Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессией, составляет ~ 1700 км². Мощность их меняется от 5 до 50 м. Объем, по предварительным оценкам, составляет 20—25 км³ без учета «тонкой» пирокластики, унесенной за пределы рассматриваемого района. Ниже приводится описание сводных разрезов игнимбритов двух полей.

Южное поле наиболее полно изучено в разрезах по правым притокам р. Верхний Стан. В основании разреза на нижнечетвертичных базальтах лежат смоляно-черные стекловатые или полустекловатые игнимбриты риодацитового состава (табл. 1) с выраженной флюидалной текстурой и незначительным (2—7%) количеством мелких (от долей миллиметра до 1—2 см) ксеногенных обломков. Степень их кристалличности варьирует от 6 до 10%. Вкрапленники, особенно плагиоклаз, подчеркивают флюидалность. На полированных срезах виден обломочный, брекчированный характер стекол. В шлифах реоигнимбриты имеют прерывистую флюидално-полосчатую, витрокластическую, плейчатую структуру основной массы, представляющую собой чередование бурых (слабораскристаллизованных) и серых, причудливо изогнутых, деформированных полос. Пемзовые обломки сплющены до полного уничтожения пористости, крепко впаяны в основную массу и угадываются по косой ориентировке пемзовых волокон. В основной массе встречаются также отдельные, вытянутые по флюидалности рогульки или гнезда бурого чистого стекла. Такое же стекло образует каемки вокруг некоторых вкрапленников плагиоклаза.

На полустекловатых игнимбритах лежат серые, сиренево- или розово-серые игнимбриты дацитового состава с фьямме и с повышенным (10—20%) количеством ксеногенного обломочного материала. Фьямме состоят из бурого стекла, с сохраняющейся местами волокнистой структурой; концы их расщеплены или резко оборваны. Иногда расщепленность прослеживается по всему контуру фьямме. Стекло содержит округлые поры, выполненные кварцполево-

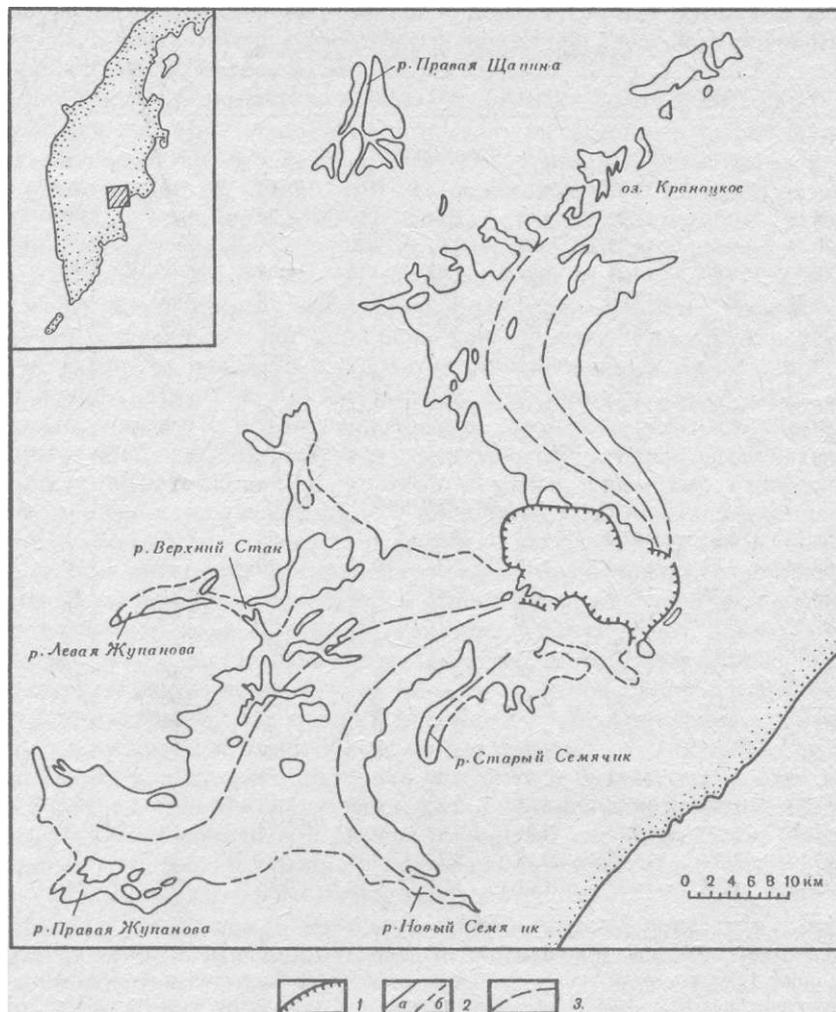


Рис. 1. поля распространения игнимбритов, связанных с Узон - Гейзерной вулканотектонической депрессией: 1 — эрозионная граница кальдеры; 2 — границы поля игнимбритов: а — установленные, б — предполагаемые; 3 — осевые линии распространения основных пирокластических потоков

шпатовым агрегатом. При высокой степени девитрификации стекла фьямме макроскопически не видны и выделяются в шлифе по рыхлым линзовидным кварц-полевошпатовым обособлениям, ограниченным иногда тонкодисперсным непросвечивающим агрегатом черного или темно-серого цвета — продуктом девитрификации стекла фьямме. Такими же тонкодисперсными примазками выглядят мелкие фьямме. В крупных, особенно в центральных частях, иногда сохраняется свежее бурое стекло. Основная масса состоит из девитрифицированных пепловых частичек с обломанными краями, которые погружены в тонкую вулканическую пыль. Рогульки стекла уплощены и, как мелкие фьямме, подчеркивают псевдофлюиальность игнимбритов.

Серые игнимбриты с фьямме в свою очередь перекрываются слабо спекшимися пеплово-пемзовыми туфами (игнимбритами) бурого, серого цвета, землистого облика, содержащими в качестве фьямме сплюснутые, волокнистые лепешки темно-бурого цвета. Длина их варьирует от первых миллиметров до 20 см, мощность от долей миллиметра до 1—2 см; состав изменяется от риодацитов до дацитов (см. табл. 1). Ближе к борту кальдеры Узон пемзовые

Таблица 1

Химический состав узонских игнимбритов

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Южное поле										
1	65,71	0,89	15,77	3,14	2,19	0,09	1,60	4,38	3,93	2,30
2	68,16	0,51	16,23	1,64	2,24	0,10	1,29	3,91	3,90	2,01
3	70,16	0,81	14,25	1,71	2,01	0,10	1,26	2,95	4,07	2,68
4	70,23	0,80	14,36	1,72	1,83	0,16	1,38	2,92	3,96	2,54
5	64,86	0,95	17,00	2,51	2,78	0,12	1,19	4,85	3,84	1,86
6	65,46	0,92	16,32	1,93	3,06	0,12	1,92	3,94	4,12	2,21
7	65,96	0,89	15,77	1,90	3,13	0,12	1,61	4,39	4,06	2,16
8	66,25	0,50	15,92	2,73	2,55	0,10	1,80	3,86	4,20	2,10
9	66,69	0,93	15,87	2,58	3,43	0,14	1,20	4,04	4,04	2,05
10	67,36	0,79	15,84	2,26	2,38	0,09	1,21	3,98	4,03	2,06
11	69,10	0,71	14,33	1,38	3,15	0,10	1,10	2,88	4,59	2,66
Северное поле										
1	68,18	0,93	14,79	1,63	3,52	0,17	1,33	3,16	3,81	2,48
2	69,34	0,84	14,24	2,40	2,36	0,09	1,20	3,28	3,90	2,83
3	69,02	0,45	14,23	2,50	2,81	0,10	1,05	2,91	3,89	2,53
4	68,54	0,96	14,08	2,40	2,77	0,13	1,42	3,39	3,77	2,54
5	68,60	0,84	13,98	3,52	1,81	0,14	1,01	3,48	4,12	2,50
6	66,62	1,07	15,68	1,84	3,33	0,16	1,51	3,86	3,78	2,15
7	65,57	1,07	15,93	2,67	4,15	0,15	1,65	3,98	3,14	1,75
8	67,85	1,02	15,49	2,92	2,82	0,11	1,16	3,14	3,37	2,12
9	63,76	1,02	16,48	1,60	4,55	0,18	1,89	4,99	3,28	1,74
10	67,09	1,03	15,83	2,32	3,70	0,12	1,50	3,58	3,10	1,73
11	68,55	0,97	14,36	2,26	2,80	0,10	1,12	3,20	3,90	2,64
12	63,34	0,80	15,73	2,86	3,93	0,14	2,24	5,20	3,77	1,98
13	63,18	0,77	15,45	3,25	3,22	0,15	2,47	5,22	4,01	2,28
14	71,12	0,54	14,27	1,61	1,21	0,12	0,83	2,61	4,56	3,13

Примечание. Анализы выполнены в ЦХЛ ИВ ДВО РАН Л.А. Карташовой, Г.П. Новоселецкой. Южное поле: 1—4 — пемзовидные фьямме; 5—11 — валовые составы игнимбритов вниз по разрезу. Северное поле: 1 — желтая пемза; 2—5 — черное шлакоподобное стекло; 6 — пемзовидные фьямме (сплюснутая пемза); 7—11 — валовой анализ игнимбритов вниз по разрезу; 12 — агглютинаты; 13, 14 — гетеротакситовые пемзы.

лепешки в туфах имеют большие размеры (до 15—20 см) и слабо ориентированы в плоскости. Ювенильный материал представлен в разной степени передробленным пемзовым материалом, вплоть до мелких (доли миллиметра) обломков пузыристой и волокнистой пемзы. По мере удаления от борта калдеры (притоки р. Верхний Стан) количество фьямме увеличивается, размер их уменьшается, они становятся более тонкими и плоскоориентированными. Основная масса состоит в основном из вулканической пыли с малым количеством дробленых пепловых частиц. Таким образом, здесь, очевидно, имела место гравитационная сортировка обломочного материала в движущемся пирокластическом потоке.

Игнимбриты, затекшие в кальдеру Большого Семячика и вложенные в долину р. Старый Семячик, в ее верхнем течении представлены серыми разновидностями с типичной эвтакситовой структурой, образованной черными обсидианоподобными фьямме. Слабоспекшиеся темно-бурые пеплово-пемзовые игнимбриты землистого облика встречаются на северном и северо-западном склонах купола Кулакова на высоте ~ 1000 м, занимая самое высокое стратиграфическое положение, что связано, вероятно, с локальным поднятием купола [6]. Облекая его, они образуют вал высотой до 10—15 м. Аналогичный разрез имеют

игнимбриты межгорной котловины в центре группы вулканов Большого Семячика. В результате резургентного поднятия при внедрении риодацитов горы Крайней они были отчленены от основного потока.

Игнимбриты Северного поля имеют довольно выдержанный разрез. Обычно выделяется два-три пласта игнимбритов, разделенных горизонтальными пластами неспекшихся пемзовых туфов. Мощность игнимбритов варьирует от первых метров до 15—20 м. В основании наиболее полного разреза, как и в случае игнимбритов Южного поля, встречаются черные стекловатые брекчированные разности с грубыми лентовидными обсидиановыми фьямме, размер которых варьирует от долей миллиметра до 10—15 см. Основная масса состоит из сплюснутых, деформированных обломков пемз, стекла размером 0,2—3 мм и незначительной доли пеплового материала и вулканической пыли, в значительной степени сваренных и гомогенизированных. Заметна плоскостная ориентировка обломков. Лентовидные фьямме сложены как однородным обсидиановым стеклом с перлитовой трещиноватостью, так и стеклами, сохранившими пемзовую волокнистую структуру, свидетельствующую о сильном сплющивании стекловатых волокон. Фьямме содержит незначительное количество кристаллической фазы. Стекловатые игнимбриты имеют дацитовый состав, наиболее однородные их разности — риодацитовый (табл. 1). Выше по разрезу они переходят в сиреневато-серые игнимбриты, содержащие субпараллельные фьямме из уплощенных лепешек волокнистой пемзы и вспученных шлакоподобных черных стекол. Размеры их достигают длины 10—20 см и толщины 1—1,5 см. Основная масса представляет собой ювенильный материал псаммитовой размерности в виде мелких кусочков бурой пемзы, сцементированных вулканической пылью. Материал грубо сортирован, встречаются участки, обогащенные тонкообломочными фракциями. В большом количестве присутствуют мелкие ксенолиты лав андезитов и базальтов. В более глубоких частях разреза на пепловую составляющую игнимбритов накладываются процессы девитрификации и порода принимает серую окраску. Необходимо отметить, что степень девитрификации игнимбритов Северного поля значительно ниже, чем у аналогичных пород Южного поля.

Верхняя часть пирокластического потока представлена слабоспекшимися темно-бурыми игнимбритами землистого облика с включениями шлакоподобного вспененного стекла риодацитового, дацитового состава (табл. 1), размером до 20—30 см. Валовой состав игнимбритов соответствует дацитам. Основная масса туфов представлена ювенильным пепловым материалом грубой размерности вплоть до пемзовых обломков размером 0,05—0,1 мм, в значительной степени деформированных и спекшихся. Объем вулканической пыли незначительный. Пемзы и черные шлакоподобные стекла содержат редкие (2—4%) вкрапления плагиоклаза и пироксена. В пепловой массе количество их возрастает до 15%.

С заключительной фазой игнимбритообразующего извержения связаны, по-видимому, слои агглютинатов, перекрывающие внешние склоны докальдерного купола на юго-восточном гребне кальдеры. Они состоят из сваренных обломков шлаков и шлакоподобных стекол андезитодацитового состава и содержат в основании гетеротакситовые прослои, кислый ингредиент которых имеет риодацитовый и дацитовый составы. В агглютинатах пепловая составляющая отсутствует. Подобные породы встречены также на северном гребне кальдеры Узон у подножия экструзии Озерной. Шлакоподобные стекла в них имеют андезитодацитовый состав (табл. 1), а сами агглютинаты на микроуровне содержат линзовидные прослои кислых (71,8% SiO₂) стекол.

Включения чуждых пород (ксенолиты) являются неотъемлемой составной частью игнимбритов. Состав включений в игнимбритах Южного поля довольно разнообразен и представлен лавами базальтов, андезитов, тонкообломочными

пелитовыми туфами, игнимбритами более ранних извержений, кристаллокластическими туфами с кварцем и роговой обманкой, ороговикованными породами, гранодиорит-порфирами. Включения в игнимбритах Северного поля более однородны и представлены в основном базальтами и андезитами. Содержание ксенолитов возрастает вверх по разрезу от первых процентов до 10—25%. В этом же направлении увеличивается и размер включений. Если в стекловатых брекчированных игнимбритах в основании разрезов размер их варьирует от долей миллиметра до 1 см, то в верхних частях преобладают разности от 2 см до 0,1 м.

Среди лавовых ксенолитов преобладают субафировые разности. Степень термального воздействия на ксенолиты определяется положением их в разрезе игнимбритов и размером. В верхней и средней частях разреза, где степень сваривания незначительная, особых признаков переработки включений не отмечено, (лишь во включениях туфов иногда видно развитие по контакту гидроокислов железа). Она возрастает в стекловатых брекчированных игнимбритах зоны интенсивного сваривания. Особенно подвержены термальному воздействию субафировые разности включений андезитов, реже базальтов размером менее 0,5 мм в стекловатых игнимбритах Северного поля. В результате прогрева включений до магматических или близких к ним температур и пропитывания магматическими флюидами они постепенно становятся все более близкими к захватившей их породе. Включения приобретают темно-бурый, почти черный цвет (остекловываются), теряют четкие границы и угадываются на фоне бурой основной массы игнимбритов лишь по скоплениям микролитов. На поверхности извлеченных ксенолитов размером до 1 см видны отрицательные (негативные) формы их рельефа, свидетельствующие о пластичном их состоянии.

Состав минералов, остаточных стекол и газовой фазы

Вкрапленники в игнимбритах представлены плагиоклазом (7—19%), орто- и клинопироксенами (1—3%) и магнетитом (1—3%). Единичные зерна роговой обманки встречены в игнимбритах Южного поля и оливина — в игнимбритах Северного. Общее количество кристаллической фазы варьирует от 8 до 23%, однако преобладают значения 14—17% от объема породы. Минимальной степенью кристалличности отличаются лавоподобные стекловатые игнимбриты в основании Южного поля, вскрытого притоками р. Верхний Стан, и включения пемз, максимальной — игнимбриты с фьямме и пепловой основной массой.

Для п л а г и о к л а з а характерны наиболее значительные (7—19%) вариации в распределении по разрезу и площади. Наряду с хорошо сохранившимися кристаллами встречаются вкрапленники обломочного облика, сплавленные, корродированные с губчатыми и ситовидными структурами. Крупные фенокристаллы отличаются большей трещиноватостью, для них более характерен обломочный облик. Некоторые вкрапленники, особенно в стекловатых разностях, окружены каемкой бурого стекла. Кристаллы обычно чистые, содержат редкие расплавные включения. Преобладающий состав плагиоклаза в игнимбритах варьирует в довольно узких пределах — от 45 до 60% An, что соответствует основному андезиту, Лабрадору (рис. 2, табл. 2). По составу ядер вкрапленников плагиоклаза выделяются три более дробные группы: 45—48, 52—56 и 58—60% An. Первые две группы имеют сквозной характер, в то время как вкрапленники третьей группы характерны в основном для агглютинатов андезито-дацитового состава в разрезах Северного поля.

Вкрапленники обычно незональны или слабозональны; встречаются редкие редкозональные кристаллы с основным ядром, отвечающим натриевому битовниту (72—76% An). Плагиоклаз образует обособленные вкрапленники, мономинеральные сростки и изредка встречается в ассоциации с орто- и клино-

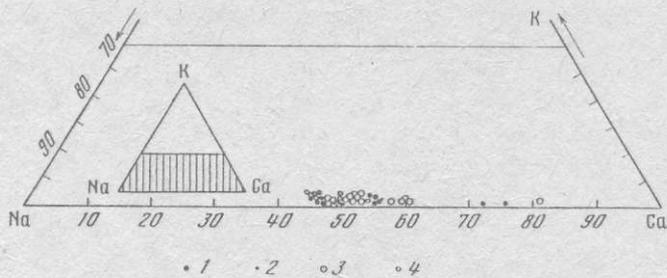


Рис. 2. Состав вкрапленников плагиоклаза. Южное поле: 1 — ядра кристаллов; 2 — промежуточные и внешние зоны; Северное поле: 3 — ядра кристаллов; 4 — промежуточные и внешние зоны

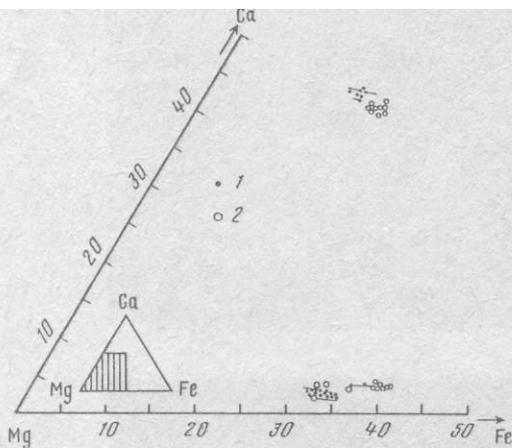


Рис. 3

Соотношение Ca—Mg—Fe в пироксенах. 1 — Южное поле, 2 — Северное поле. Векторы указывают на изменение состава в каймах

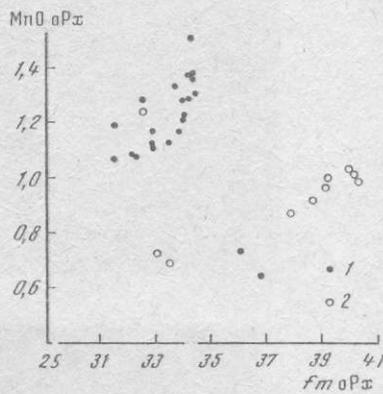


Рис. 4

Распределение MnO в ортопироксенах в зависимости от железистости минералов. Условные обозначения на рис. 3

пироксеном. Корродированные зерна, представленные основным плагиоклазом, имеют ситовидный и губчатый облик, трещиноваты, подвержены вторичным изменениям и являются, очевидно, ксеногенными.

Пироксены в игнимбритах встречаются в переменном количестве (1—3% от объема породы). Вкрапленники игнимбригов Южного и Северного полей образуют на диаграмме (рис. 3, табл. 2) обособленные рои, что может свидетельствовать об отличающихся условиях их кристаллизации. В игнимбригах, развитых к северу от кальдеры, гиперстены и авгиты, характеризуются большей железистостью. В то же время содержание кальция в них неоднозначно: при большей железистости гиперстены Северного поля обладают повышенным содержанием волластонитового минала и пониженным — марганца (рис. 4). Встречается пироксен в ассоциации с основным андезитом и Лабрадором. Среди пироксенов игнимбригов Северного поля наименьшей железистостью отличаются вкрапленники из агглютинатов.

Рудные минералы представлены титаномагнетитом и ильменитом. Магнетит отличается низким содержанием титана (1—9%).

Микроструктуры игнимбригов и состав стекла. Эти данные получены при изучении пород на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax. В основании разрезов лежат обсидианоподобные стекловатые разности — реоигним-

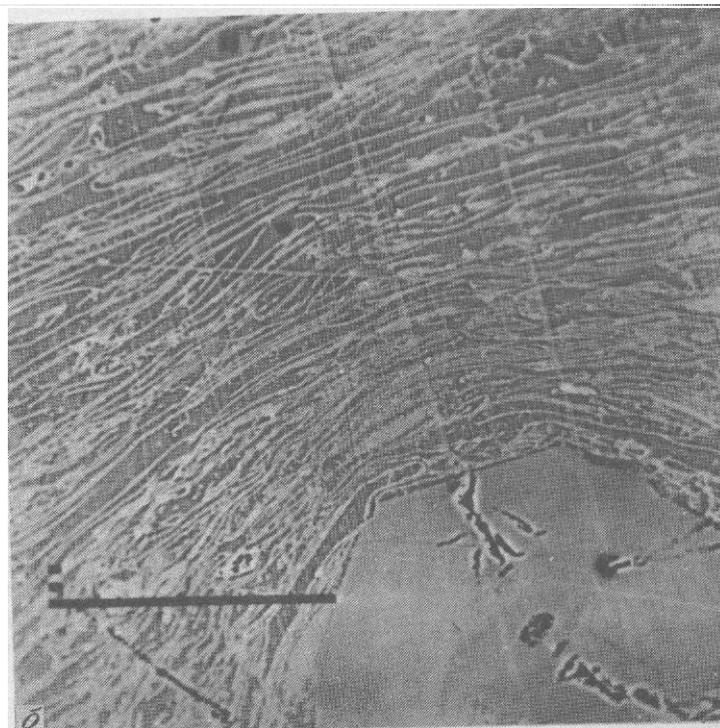
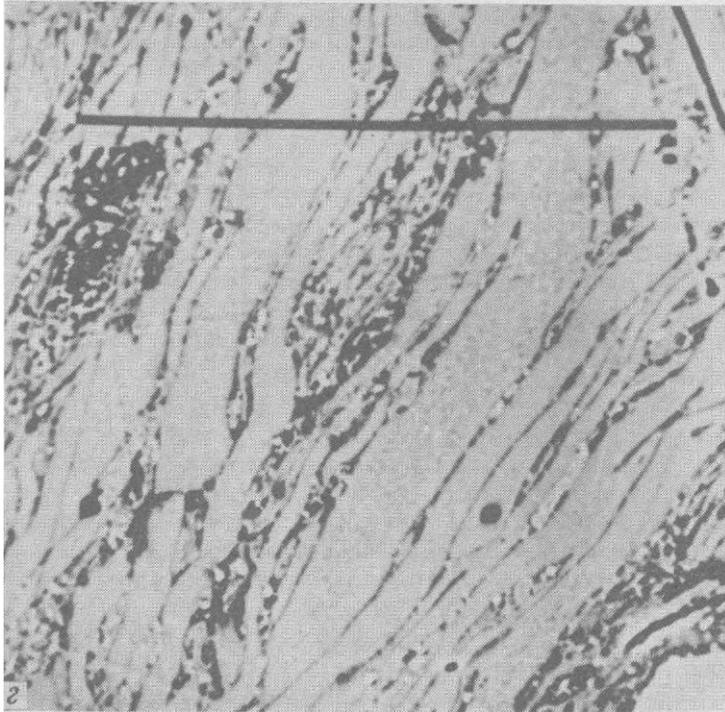
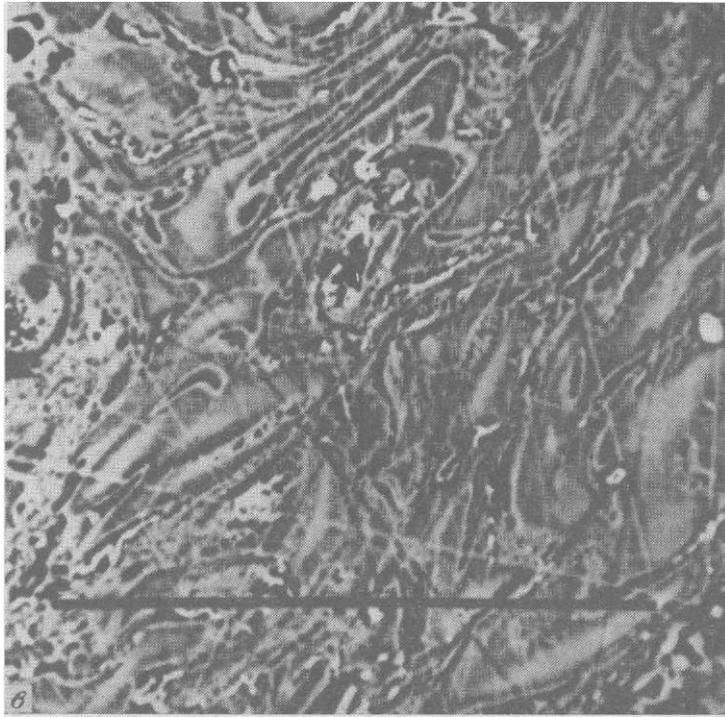


Рис 5 Микроструктуры стекол в игнимбригах (растровый микроскоп микрозонда): а - обособления (центры раскристаллизации) в гомогенизированном стекле; нижняя часть разреза, Северное поле;

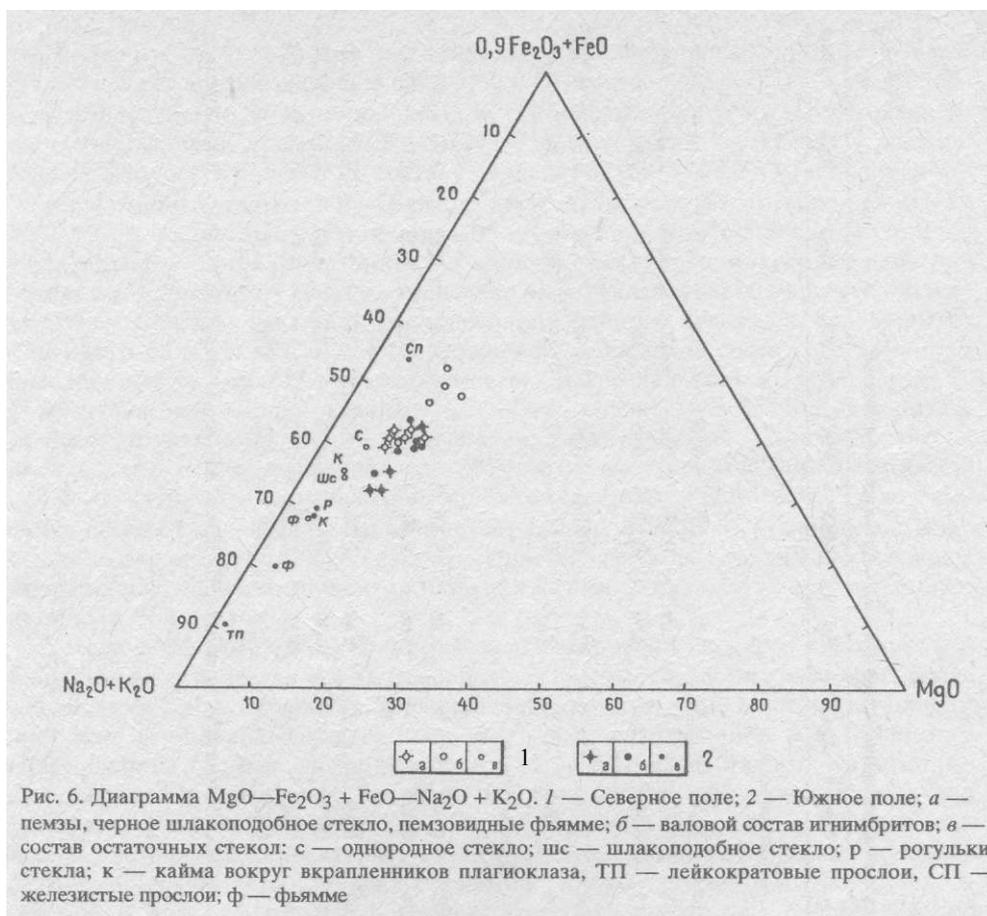


6 — витрофирная основная масса стекловатых игнимбритов (реоигнимбритов), Южное поле;
в — пепловая составляющая в игнимбритах с эвтакситовой структурой, Северное поле; 2 — фьямме
из средней части разреза игнимбритов, Северное поле

Составы минеральных фаз узонских ипнамбригов

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	57,83	56,65	53,57	47,11	52,32	52,64	51,99	52,22	53,70	54,21	52,18	51,63	0,0	0,0
TiO ₂	0,0	0,02	0,0	0,02	0,25	0,22	0,42	0,50	0,16	0,17	0,46	0,43	7,14	39,83
Al ₂ O ₃	27,29	28,12	28,77	33,04	0,89	0,54	1,35	1,78	0,51	0,51	1,96	1,80	2,26	0,62
FeO	0,56	0,60	0,70	0,71	24,18	22,51	12,49	11,89	19,11	19,47	10,24	10,21	88,79	56,42
MnO	0,01	0,0	0,0	0,02	1,04	0,87	0,61	0,44	1,19	1,29	0,77	0,75	0,87	0,95
MgO	0,04	0,0	0,05	0,03	19,86	20,80	13,44	13,94	23,37	22,73	13,66	13,73	1,77	2,64
CaO	9,10	10,37	11,64	16,68	1,73	1,68	18,94	19,19	1,37	1,35	19,82	20,27	0,0	0,0
Na ₂ O	5,69	4,95	4,37	1,96	0,0	0,0	0,06	0,20	0,01	0,01	0,31	0,25	0,0	0,0
K ₂ O	0,26	0,26	0,21	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Or	100,78	99,98	99,32	99,62	100,28	99,24	99,29	100,16	99,44	99,72	99,41	99,13	100,86	100,48
Ab	1,55	1,57	1,24	0,31										
An	52,26	45,61	39,93	17,47										
Wo	46,20	52,81	58,82	82,22										
En					3,58	3,48	39,98	40,09	2,82	2,80	42,34	42,62		
Fs					57,29	60,06	39,46	40,52	66,62	65,65	40,59	40,16		
Fm					39,13	36,46	20,57	19,39	30,56	31,55	17,08	17,23		
					40,58	37,78	34,27	32,37	31,45	32,46	29,61	30,02		

Примечание. Составы минеральных фаз получены на рентгеноспектральном микроанализаторе.



бриты, степень девитрификации которых возрастает вверх по разрезу. В игнимбритах Северного поля это сравнительно однородное гомогенизированное стекло с округлыми (3—4 мм) очагами сферолитовой раскристаллизации (рис. 5, а). Наиболее свежие обсидианоподобные игнимбриты Южного поля имеют необычную псевдофлюидальную структуру, представляющую собой в отраженном свете чередование темных более мощных (0,1—3 мм) и тонких (до 0,005 мм) петельчатых светлых полос. Линии флюидальности огибают фенокристаллы (рис. 5, б). В средней части разреза, характеризующейся относительно слабым спеканием, основная масса состоит из слабоориентированных пепловых частиц с обломанными и сглаженными краями (рис. 5, в). Местами видны сплюснутые частицы. В девитрицированных разностях эти структуры теряются. Фьямме, характерные для этой части разреза, представляют собой: 1) сплюснутые фрагменты однородных стекол; они могут быть дегазированы, но могут содержать растворенные летучие, которые при остывании выполняют округлые поры, слагая черепитчатый кристобалит. Границы таких фьямме часто имеют зазубренные ограничения, оборванные или расщепленные концы, что свидетельствует о высокой их вязкости; 2) фрагменты стекла, сохраняющие реликты волокнистой структуры, образованные сдавливанием вспученных стекол (рис. 5, г); 3) в верхних частях разреза фьямме представлены сплюснутыми пемзовидными лепешками. Интенсивность их окраски находится в прямой зависимости от степени сжатия.

Составы остаточных стекол игнимбритов Северного и Южного полей различаются между собой. Так, в игнимбритах Южного поля каймы чистого

Химические составы стекол в узонских итнимбригах (представительные микрозондовые анализы)

Положение в разрезе	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
	Южное поле									
1. Итнимбриг обсидианоподобный										
а) темные прослой* (3)	75,14	0,45	14,37	0,78	0,05	0,05	1,24	3,83	3,14	99,05
б) светлые прослой* (2)	68,38	0,75	13,75	7,09	0,16	0,66	2,20	2,88	2,71	99,58
в) каймы вокруг вкрапленников плагноклаза (2)	73,15	0,50	13,61	2,66	0,12	0,49	2,03	3,74	2,92	99,32
2. Итнимбриг с фьямме:										
а) основная масса (4)	73,84	0,49	14,35	2,57	0,11	0,60	1,90	5,32	1,51	100,69
б) фьямме (8)	72,14	0,50	13,72	2,17	0,11	0,52	1,68	2,57	6,44	99,85
Северное поле										
1. Итнимбриг обсидианоподобный:										
а) однородное стекло (3)	71,05	0,64	13,85	3,80	0,13	0,66	3,67	2,12	3,20	99,12
б) кайма вокруг плагноклаза	70,66	0,60	13,92	3,66	0,10	0,56	2,88	4,22	2,03	98,48
2. Итнимбриг с фьямме:										
а) фьямме (5)	70,60	0,55	13,22	3,49	0,14	0,52	1,24	2,39	6,61	98,35
б) округлое обособление во фьямме (2)	69,75	0,83	14,17	4,30	0,10	0,77	3,33	4,60	0,39	98,24
в) основная масса (3)	70,60	0,76	13,67	4,85	0,13	0,70	1,75	4,25	2,09	98,80
3) Черное шлакоподобное стекло (2)	69,72	0,67	14,34	3,64	0,10	0,68	3,16	4,28	2,13	98,72

Примечание. Составы стекол получены на рентгеноспектральном микроанализаторе *SamebaX* (ИВ ДВО РАН, аналитики В.А. Ананьев, В.М. Чубаров, Т.М. Философова). В скобках — количество анализов.

*Цвет прослоев в отраженном свете.

стекла вокруг вкрапленников плагиоклаза, рогульки пепловых частиц и фьямме имеют в основном риолитовый (74—75% SiO₂) состав (табл. 3). Темные полосы во флюидальных обсидианоподобных игнимбритах характеризуются повышенным содержанием кремнекислоты (74—75%) и низким — железа и магния. Светлые полосы отвечают по составу риодацитам (68—70% SiO₂) и отличаются от первых повышенным (в 9—10 раз) содержанием железа (соответственно 0,83 и 6—7%) и магния (соответственно 0,05 и 0,6—1%). Менее значимые отличия в содержании щелочей, алюминия и кальция. Микроскопически железистые прослойки соответствуют тонким интенсивно окрашенным границам раздела между прослоями бурого, частично раскристаллизованного стекла. В игнимбритах Северного поля стекла имеют в основном риодацитовый состав и отличаются повышенной железистостью, титанистостью, магниезиальностью (табл. 3, рис. 6). Сумма щелочей в них составляет 6,2—6,4%, возрастающая в разностях с эвтакситовой структурой до 8—9%. В последних между фьямме и основной массой происходит перераспределение щелочей: фьямме обогащаются калием, основная масса — натрием. Округлые обособления (сферолиты?) в стекле (рис. 5, а) отличаются от матрицы почти натриевым составом (табл. 3). И наконец, состав шлакоподобных пемз и стекол из верхней части разреза по содержанию основных породообразующих компонентов близок к фьямме, отличаясь лишь соотношением щелочей.

Состав флюидной фазы. По разрезам игнимбритов Северного и Южного полей, а также в обломках пемз и пемзовидных фьямме было определены валовые содержания газов. Анализ их проводился на хроматографе с предварительным дроблением образца и нагревом до 800°. Анализ выполнен А.В. Ткаченко (Лаборатория геологии рудных районов ИГН АН Казахстана, г. Караганда). Состав газа в игнимбритах Северного и Южного полей одинаков и представлен (в порядке убывания) — H₂O, H₂S, CO₂, CO, H₂, CH₄ и C₂H₂ (рис. 7). Первые два анализа на графиках характеризуют распределение газа в пемзовых включениях (Северное поле) и пемзовидных фьямме (Южное поле); три последних — отражают содержание газа в игнимбритах последовательно сверху вниз по разрезу. На графиках видно, что максимальное количество газа отмечено в пемзах; в игнимбритах количество флюидной фазы резко сокращается. Основным компонентом является вода, содержание которой составляет 67—84% от общего объема газа. Количество ее уменьшается сверху вниз по разрезу от

Таблица 4

Состав газа в узонских игнимбритах

Масса газов	Т° С						
	200	400	600	800	900	1000	1100
Северное поле							
18 (H ₂ O)	0,3	0,56	0,68	0,83	0,83	0,91	1,16
	0,45	0,91	0,91	1,06	1,0		1,2
28 (N ₂)	0,22	0,28	0,28	0,38	0,43	0,46	0,46
	0,0	0,17	0,17	0,26	0,38	0,48	0,83
Южное поле							
18(H ₂ O)	0,25	0,41	0,51	0,66	0,75	0,75	0,73
	0,53	0,71	0,75	0,90	0,93	1,0	1,16
28 (N ₂)	0,0	0,15	0,10	0,23	0,23	0,33	0,55
	0,3	0,38	0,36	0,46	0,46	0,58	0,80

Примечание. В числителе — интенсивность газоотделения в плагиоклазе, в знаменателе — в пироксене.

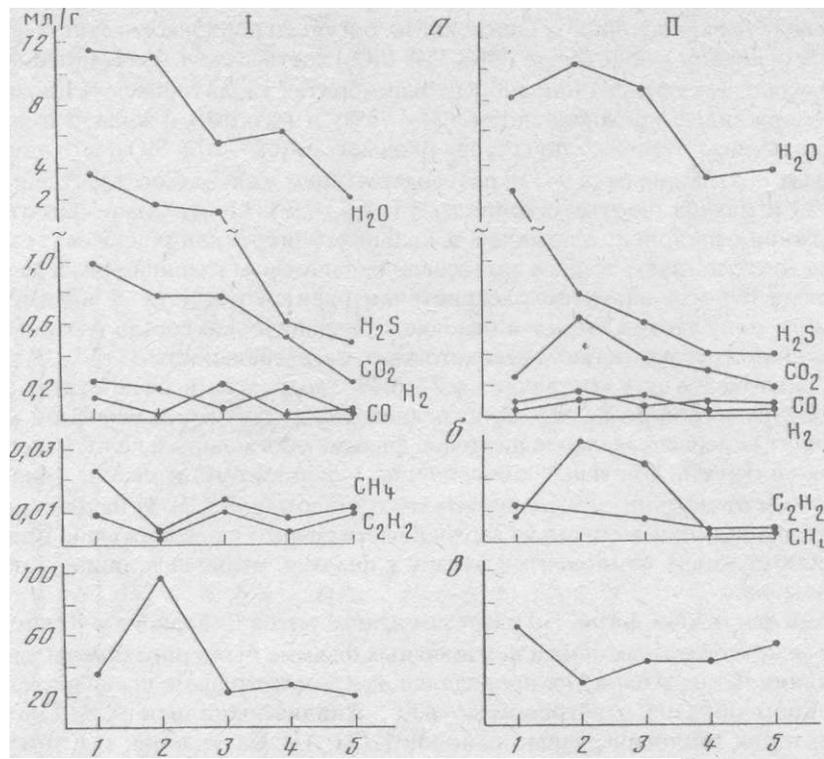


Рис. 7. Состав флюидной фазы игнимбригов по разрезам пирокластических потоков; а, б — составы газов; в — отношение окисленных газов к восстановленным. I — Северное поле: 1 — пемзы; 2 — черные шлакоподобные стекла; 3 — слабоспекшиеся игнимбриги землистого облика; 4 — умеренно спекшиеся игнимбриги с фьямме из шлакоподобного стекла; 5 — игнимбриги с эвтакситовой структурой. II — Южное поле: 1 — сплюснутые пемзовидные фьямме; 2 — слабоспекшиеся игнимбриги землистого облика; 3 — умеренно спекшиеся игнимбриги со сплюснутыми пемзовидными фьямме; 4 — игнимбриги с эвтакситовой структурой; 5 — стекловатый брекчированный игнимбриг

вниз по разрезу от 12 мг/г в пемзах до 2—3 мг/г в стекловатых брекчированных разностях в основании разреза. Незначительное возрастание содержания H_2O отмечено также в игнимбригах с эвтакситовой структурой. Восстановленные газы, такие, как CO , H_2S , H_2 и углеводороды, присутствуют в игнимбригах в переменных количествах; определенных закономерностей в распределении их по фациальным разностям игнимбригов не отмечено. Обращает внимание повышенное содержание в газах метана и ацетилена (C_2H_2). Присутствие их, а также H_2S может быть связано с обугливанием органики растительного покрова при скатывании пирокластических потоков; они могут быть захвачены из осадочных толщ под кальдерой. Общее количество газа (и окисленных в том числе) больше в игнимбригах Северного поля, что, видимо, связано с различным исходным его содержанием в расплаве.

В монофракциях плагиоклаза и пироксена из пемзовидных включений верхней части разрезов игнимбригов был сделан качественный анализ газов, законсервированных в минералах, на масс-спектрометре MX 7201 при ступенчатом нагреве до $1100^\circ C$ (табл. 4). Состав газов в монофракциях отличается от валового их анализа, что зависит, очевидно, от чувствительности методов. Максимальная эмиссия достигается в интервале $1000—1100^\circ C$. Определены газы с массой 18 (H_2O) и 28 (скорее азот, чем CO). Во всех экспериментах и во всем интервале температур (особенно в начале нагрева) вода преобладает

над азотом. В пироксенах интенсивность выделения газов с массой 18 значительно выше, чем в плагиоклазах. Различается интенсивность выделения газов в минеральных фракциях разных пирокластических потоков. Так, для игнимбритов Северного поля существенно возрастает суммарная интенсивность выделяемых газов и доля воды по сравнению с газом с массой 28 (азотом), т.е. подтверждается более высокая степень окисленности газов при формировании этих игнимбригов.

Обсуждение результатов

Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия состоит из нескольких слившихся кальдер. Диаметр их увеличивается с востока на запад. Направления течения пирокластического материала свидетельствуют о том, что игнимбриды Северного поля связаны (в основном) с восточной частью депрессии — с кальдерой Долины гейзеров, а Южного — с западной ее частью — с кальдерой Узон. Ранее была сделана попытка оценить размер очага и глубину ее кровли [3]. В районе Долины гейзеров по системе дуговых даек глубина верхней кромки очага определена в 7—8 км, а диаметр его проекции на поверхности в 9—10 км. На основании наблюдающегося увеличения диаметра кольцевых структур и асимметрии в строении бортов было высказано предположение о погружении кровли очага (или системы очагов) к западу, т.е. о большей глубине очага над кальдерой Узон. Большое разнообразие ксеногенного материала в игнимбригах Южного поля, присутствие в них осадочных, ороговикованных и субвулканических разностей пород подтверждает это предположение. Об этом может свидетельствовать, очевидно, и меньший по сравнению с игнимбридами Северного поля объем доли окисленных газов в них.

Состав игнимбритообразующего расплава и его температура. Игнимбриды имеют относительно постоянный дацитовый состав. Лишь в основании отдельных разрезов наблюдаются незначительные по мощности обсидианоподобные игнимбриды риодацитового состава (табл. 1). Игнимбриды Южного поля отличаются большей щелочностью (в основном за счет натрия) и магнизиальностью, в то время как игнимбриды Северного поля более железистые, с меньшим содержанием щелочей (рис. 6). Валовой состав игнимбригов обычно не отражает состав первичного расплава, что в первую очередь связано с выдуванием легкой пепловой фракции в процессе извержения и движения пирокластического потока, а также обогащения вследствие этого игнимбригов кристаллической фазой [13] и с насыщенностью игнимбригов резургентным материалом. О составе расплава можно судить по фрагментарным его частям в игнимбригах: фьямме, рогулькам стекла, включениям пемз. В то же время в результате активных метасоматических процессов, протекающих внутри пирокластических потоков, происходит перераспределение щелочей и стекло фьямме обогащается калием [7], создавая ложное впечатление высокой калиевости расплава [5]. Наиболее достоверно состав игнимбритообразующего расплава отражают пемзовидные фьямме и пемзовые включения в слабопересекающихся туфах верхних частей разреза, так как они не подвергались процессам девитрификации, сохранив нормальное соотношение щелочей. Близки к составу первоначального расплава также обсидианоподобные игнимбриды в основании разрезов. Они относительно однородны, содержат, как и пемзы, незначительное количество кристаллической фазы и состоят в основном из гомогенизированных пеплово-пемзовых фрагментов расплава. Количество обломочного материала в них не превышает 2—5% от объема породы.

Пемзовидные фьямме в игнимбригах Южного поля имеют риодацитовый и дацитовый состав (табл. 3); шлакоподобные включения в игнимбригах Северного поля — преимущественно риодацитового состава (в пересчете на безводный остаток), от обычных пемз они отличаются повышенным

содержанием окисного железа. Согласно модели флюидной динамической откачки пирокластического материала из корового резервуара [11], присутствие в верхних частях разреза различных по составу пемзовых включений одновременно со снижением кислотности игнимбритов вверх по разрезу является показателем стратификации расплава в этом очаге. Незначительное различие в составе пемзовых включений в игнимбритах свидетельствует о слабой стратификации его в зоне, дренируемой извержением. В то же время андезитодацитовый состав агглютинатов, извергнутых в заключительную фазу игнимбритообразующего извержения в восточной части депрессии, позволяет предполагать, что ниже кислотной зоны могла существовать зона более основного, андезитового состава.

Игнимбриды Северного и Южного полей различаются составом вкрапленников и остаточного стекла (рис. 2, 3, 6; таб. 2 и 3). Близость состава фьямме, пемзовых и пепловых обломков к составу стекла каемок, окружающих фенокристаллы плагиоклаза, указывает на то, что вкрапленники и стекло являются фрагментами одного расплава. Сравнительно однородный состав вкрапленников, относительно хорошая их сохранность и свежий облик убеждают в том, что они образовались из материнского расплава и не являются ксеногенными. Присутствие в игнимбридах трех групп фенокристаллов плагиоклаза, различающихся по составу ядер, также подтверждает наличие слабой стратификации в коровом очаге. Существует, как нам кажется, ряд признаков, указывающих на то, что игнимбриды Северного поля были более высокотемпературными. Так, вкрапленники плагиоклаза в них отличаются повышенной основностью, а ортопироксена — содержат более низкие по отношению к пироксенам игнимбридов Южного поля содержания марганца (рис. 4). В свою очередь увеличение волластонитового компонента в гиперстенах Северного поля с одновременным уменьшением его в сосуществующих авгитах служит, согласно экспериментальным данным [12], показателем возрастания температуры расплава (рис. 3). Высокая железистость пироксенов Северного поля определяется, вероятно, высокой фугитивностью кислорода, что выражается в возрастании роли железотитанистых окислов в игнимбридах этого потока, высокой степенью окисленности черных шлакоподобных стекол в них, повышенным содержанием во флюиде доли окисленных газов. Значения температуры, рассчитанные по двупироксеновому геотермометру, составляют для игнимбридов Северного поля 1018—1062° С, для Южного —1008—1024° С [15]. О более высокой температуре игнимбридов Северного потока говорит и значительная степень термального воздействия игнимбритообразующего расплава на ксеногенный материал.

Б.И. Пийп [8], изучая игнимбриды, лежащие к северу от кальдеры Узон, отмечал значительную роль в их происхождении явлений гибридизации, считая, что при подъеме из глубинных уровней земной коры очень горячей безводной риолитовой магмы в область корней базальтового вулкана происходит процесс расплавления и ассимиляции базальтового материала. Нам представляется, что ассимиляция происходит не в процессе формирования очага путем плавления базальтов, слагающих корни вулкана, а за счет усвоения мелко- и средне-обломочного резургентного материала, образующегося при разрушении этих зон в процессе кальдерообразующего извержения. Большое количество ксеногенных обломков повышает основность валового состава игнимбридов до 61—63% SiO₂. В то же время налет «основности» остаточных стекол игнимбридов Северного поля и более высокие температуры расплава, несмотря на меньшую глубину корового очага, определяются, возможно, тем, что магматический резервуар пространственно расположен вблизи глубинной проницаемой зоны северо-восточного простирания, по которой поступают на поверхность базальтовые расплавы. В результате инъецирования базальтов в основании корового очага и последующей конвекции в верхней его зоне кислотность игнимбритообразу-

ющего расплава несколько снижается, повышается его температура, происходит смешивание расплавов из приграничных зон, что отражается и на составе минералов — вкрапленников. Высококальциевые ядра или гиоклазов являются, очевидно, кристаллическими фазами этих высокотемпературных расплавов.

Условия образования игнимбритов. В последние годы достигнуты большие успехи в изучении механизма образования пирокластических потоков. Наиболее подробно изучены различные типы отложений, связанных с современными вулканами (Безымянным, Сент-Хеленс, Катмай и др.) [1]. Несмотря на значительный прогресс в этой области, остается много неясных вопросов, особенно касающихся механизма образования спекшихся отложений пирокластических потоков — игнимбритов. Согласно одной из распространенных точек зрения, считается, что спекание пирокластического материала происходит под действием собственного веса отложений и высокой температуры после остановки пирокластического потока. Однако малая мощность слоев обсидианоподобных игнимбритов, наблюдающихся нередко в основании потоков, «оторванность» их в ряде случаев от основного тела и «захлест» на склоны возвышенностей, где они могут иметь мощность, не превышающую 0,5 м, свидетельствуют о том, что, очевидно, существует другой механизм их образования. Примером подобного рода отложения являются флюидалные реоигнимбриты в разрезе Южного поля узонских игнимбритов. В них сохранилась скрытая брекчиевая текстура, состоящая из сплюснутых до полного уничтожения пористости пемзовых обломков, погруженных в стекловатую основную массу с флюидално-петельчатой структурой (рис. 5, 6). Неоднородность текстурного рисунка основной массы в отраженном свете сопряжена с неоднородностью состава слагающих ее элементов: темные полосы отличаются выраженным лейкократовым характером, светлые, дацитовые, — повышенным (иногда в 9—10 раз) содержанием железа. Мощность железистых прослоев 3—5 мкм. Микроскопически они представляют собой границы раздела между свилеватыми прослоями частично раскристаллизованного стекла. Подобные структуры были описаны ранее в гиалоигнимбритах ольской свиты Охотско-Чукотского вулканического пояса [4], где возникновение их объяснялось явлениями ликвации. Наше представление о происхождении подобных структур иное. При изучении шлифов умеренно спекшихся разностей пепловых туфов, в которых определяются границы пепловых частиц, видно, что последние окружены тонкой окисленной каймой, состоящей из тонкодисперсных выделений окислов железа. Процесс окисления начинался, очевидно, с момента дезинтеграции расплава. В основании эруптивной колонны под большим флюидным давлением находится наиболее однородная, горячая и плотная ее часть, которая при обрушении оказывается в основании потока. Очевидно, уже в процессе движения происходит сминание, сплющивание, и сваривание пеплово-пемзового материала в его основании и регенерация в расплав, т.е. образование реоигнимбритов. При этом флюидная фаза сжимается, происходит частичное растворение ее в вязком стекле по периферии пепловых частиц. В процессе рентгеноспектрального анализа дацитовых полос образуются большие кратеры сгорания, что является показателем высокой флюидизации этих зон. Поперечное сжатие и линейное распределение флюидной фазы в нижней части пеплово-пемзового пирокластического потока способствовало более длительному удержанию ее в потоке, а свилеватые железистые прослои, насыщенные летучими, могли выполнять роль смазки, обеспечивая высокую его подвижность, и «опережающее» движение. Очевидно, поэтому относительно однородные (лавового облика) обсидианоподобные реоигнимбриты с флюидалной текстурой обнаруживаются в основании пирокластических потоков на удалении от края кальдеры, где они могут иметь незначительную мощность. Этот механизм снимает противоречие между степенью сваривания и мощностью потока [5]. Образование базальной зоны реоигним-

бритов определяется, очевидно, объемом игнимбритообразующего расплава и его температурой. В обычных пирокластических потоках эти параметры, по-видимому, более низкие, поэтому спекание не происходит.

Вблизи кальдеры преобладают грубообломочные брекчированные фации игнимбритов, содержащие незначительное количество пепловой составляющей, часто они грубосортированы и насыщены кристаллической фазой. Пемзы и фьямме обычно субафировые и содержат не более 4% кристаллической фазы от объема породы. Обогащение ею игнимбритов, особенно верхних частей разреза (17—20%), происходит за счет эоловой сепарации мелких стекловатых пепловых частиц [13]. Потеря стекла игнимбритами оценивается в некоторых случаях в 20—40% [14].

На основании анализа строения пирокластических потоков и состава минеральных фаз нам представляется, что основной объем игнимбритов как Северного, так и Южного полей образовался в результате разовых выбросов относительно однородного высокофлюидизированного пирокластического материала. Повторяющиеся в верхней части разреза игнимбритов Северного поля прослойки слоистых пемзовых туфов позволяют сделать вывод о том, что вслед за этим следовала серия более слабых взрывов. Согласно [8], извержение игнимбритов Северного поля (краноцких, по [8]) происходило в виде непрерывных «взрывовывдуваний» горячей эмульсии газов и расплава. Однако при таком механизме происходит быстрое охлаждение пирокластического материала и образуются слабоспекшиеся туфы, подобные тем, которые наблюдаются в верхах игнимбритовых разрезов. Слои агглютинатов, состоящие из сваренных обломков шлакоподобных и однородных стекол, обнаруженные местами на внешних склонах борта кальдеры, образовались, очевидно, в результате фонтанирования расплава.

Наблюдение за некоторыми современными извержениями показывает, что существует тесная ассоциация пирокластических потоков с формированием эруптивной колонны. В то же время отсутствие игнимбритов на сопредельных с бортом депрессии возвышенностях позволило одному из авторов (В.И. Леонову) высказать предположение об истечении пеплово-газовой эмульсии в наиболее пониженных местах бортов кальдеры. Среди современных извержений отмечались случаи образования пирокластических потоков вследствие перетекания высокогазонасыщенной магмы через край кратера (кальдеру?). Возможно, одновременно с извержением игнимбритов происходило обрушение дна кальдеры и запруживание в ней части пирокластического материала с последующим истечением его в наиболее пониженных местах бортов сформировавшейся депрессии. Близкий состав минеральных фаз в пределах каждого поля и различия их между собой свидетельствуют об относительно однородном составе игнимбритообразующего расплава в каждом конкретном случае, но о разных условиях их кристаллизации, определяемых, очевидно, глубиной кровли корового очага (или системы очагов). Андезитодацитовый состав агглютинатов заключительной стадии кальдерообразующего извержения в восточной части депрессии и находки среди них прослоев гетеротакситовых пемз свидетельствуют о зональном строении корового резервуара. Ниже кислой (риодацитово́й) зоны, возможно, присутствовали расплавы более основного (дацитового и андезитового) состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А. О генетической классификации пирокластических отложений извержения вулкана Безымянный 1955—1956 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 39—56.
2. Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. 261 с.

3. Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Коровый магматический очаг в недрах Узон-Гейзерного района на Камчатке // Вулканизм и связанные с ним процессы. Вып. III. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 31—33.
4. Захаров М.Н., Бобров Ю.Д. Внутреннее строение и химический состав фаз гиалоигнимбрита ольской свиты Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Докл. АН СССР. 1988. Т. 301. № 6. С. 1454—1457.
5. Короновский Н.В., Попов В.С., Николаев Ю.С. Геология кислых лав и проблемы происхождения игнимбригов // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1982. № 5. С. 26—35.
6. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Гора Крайняя на вулкане Большой Семячик (Камчатка) — пример резургенции в позднеплейстоценовой кальдере // Вулканизм, структуры и рудообразование. Тез. докл. VII Всесоюз. вулканол. совещ. Петропавловск-Камчатский, 1992. С. 58—59.
7. Маракушев А.А., Яковлева Е.Б. Генезис кислых лав // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1975. № 1. С. 3—24.
8. Пийп Б.И. Кроноцкие игнимбриги на Камчатке // Туфолавы и игнимбриги. Тр. лаб. вулканологии АН СССР. 1961. Вып. 20. С. 90—91.
9. Флоренский И.В. К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102—107.
10. Шеймович В.С., Брайцева О.А., Краевая Т.С. Четвертичные игнимбриги Семячикского района на Камчатке // Кислый вулканизм. Новосибирск: Наука, 1973. С. 110—120.
11. Blake S., Jvey G.N. Magma mixing and the dynamics of withdrawal from stratified reservoirs // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1986. V. 27. P. 153—178.
12. Lindsley D., Dixon S. Diopside-enstatite equilibria at 850° to 1400° C, 5 to 35 kb // Amer. J. Sci. 1976. V. 276. № 10. P. 1285—1301.
13. Walker G.P.L. Crystal concentration in ignimbrites // Contrib. Mineral. Petrol. 1972. V. 36. P. 135—146.
14. Wright J.V. The Rio Caliente ignimbrite: analysis of a compound intraplinian ignimbrite from a Major late Quaternary Mexican eruption // Bull. Volcanol. 1981. V. 44—2. P. 190—212.
15. Wood B.J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex system // Contrib. Mineral. Petrol. 1973. V. 42. № 2. P. 109—124.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
4.12.1992