

**ИГНИМБРИТЫ КАЛЬДЕРЫ БОЛЬШОЙ СЕМЯЧИК (КАМЧАТКА):
СОСТАВ, СТРОЕНИЕ, УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ**

Выделены три петрохимических игнимбритообразующих этапа, которые начинались извержением пирокластических потоков риолитово-дацитового состава и заканчивались формированием андезитовых-андезитобазальтовых игнимбритов. Составы порообразующих минералов и остаточных стекол определены с помощью рентгеноспектрального микроанализа (Camebax), проведена корреляция разрезов с использованием минералогического критерия. С помощью расчетных геотермометров оценены температуры игнимбритообразующего расплава. Выявлен качественный состав газов, оклюдированных в минералах (масс-спектрометрия). Характер изменения химизма игнимбритов, существование различных минеральных ассоциаций и разных по составу стекол свидетельствуют о том, что в недрах кальдеры Большой Семячик в среднем плейстоцене существовал зональный коровый магматический очаг.

IGNIMBRITES FROM BOLSHOI SEMIACHIK CALDERA (KAMCHATKA): COMPOSITION, STRUCTURE AND CONDITIONS OF FORMATION, by Grib E.N. and Leonov V.L. Three petrochemical ignimbrite-forming stages can be recognized. They began with the rhyolitedacite pyroclastic flow eruption and concluded with the formation of ignimbrites of andesite — basaltic andesite composition. Compositions of rock-forming minerals and residual glasses were determined with the help of X-ray spectral microanalysis («Camebax») and correlation of sections was made using the mineralogical criterion. Temperatures of the ignimbrite-forming melt were estimated by using the calculation geothermometers. The qualitative composition of gases occluded in minerals has been detected (mass spectrometry). The character of variation in the chemical characteristics of ignimbrites and the existence of different mineral assemblages and compositionally different glasses point out to the existence of a zonal crustal magma chamber in the interior of Bolshoi Semiachik caldera in the Mid Pleistocene.

(Received December 9, 1991)

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

Игнимбриты распространены на Восточной Камчатке очень широко. Они связаны здесь с серией кальдер и вулканотектонических депрессий, сформировавшихся в позднем плейстоцене. Один из районов, где игнимбриты хорошо обнажены и относительно легко доступны для изучения — побережье Кроноцкого залива (рис. 1). Здесь вскрываются игнимбриты, связанные с тремя крупными кальдерными центрами — Карымским, Больше-Семячикским и Узонско-Гейзерным. Далее эти игнимбриты мы будем называть соответственно: карымские, семячикские и узонские. В настоящей работе рассмотрены новые данные о строении, составе и условиях образования игнимбритов, связанных с кальдерой Большой Семячик (семячикских). Они перекрывают аналогичные породы расположенного южнее Карымского центра и в свою очередь перекрываются узонскими игнимбритами. На рис. 2 приведена сводная стратиграфическая колонка игнимбритов, вскрытых на рассматриваемой территории. Разрез семячикских игнимбритов состоит из серии-пластов собственно игнимбритов, разделенных слоями пемзовых, озерных или ледниковых отложений. Ранее этот разрез описывался достаточно подробно другими исследователями [1—3, 5, 8, 9]. Принятая в [8, 9] индексация пластов игнимбритов и вводимые нами изменения приведены в отдельных колонках на рис. 2. Особенности залегания игнимбритов и их взаимо-

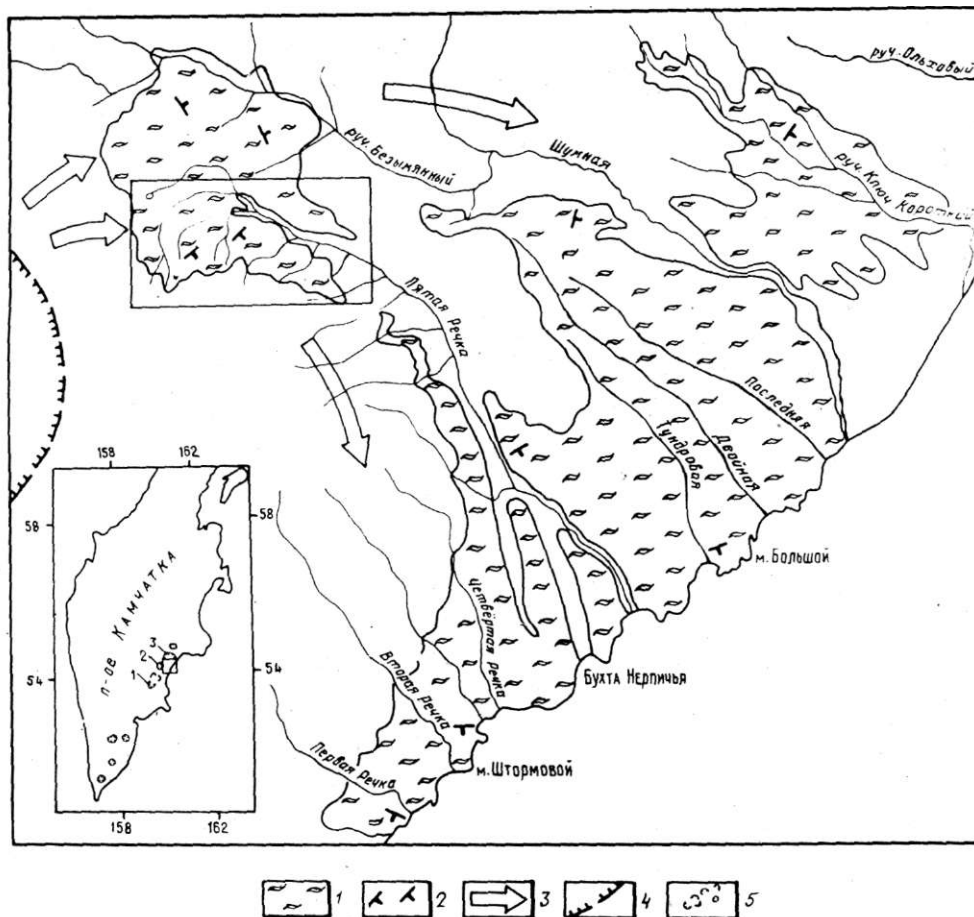


Рис. 1. Схема расположения изученных районов. 1 — игнимбриды, связанные с кальдерой Большой Семячик; 2 — замеренные элементы залегания пластов игнимбридов; 3 — реконструированные направления, по которым распространялись пирокластические потоки; 4 — структурные границы кальдеры Большой Семячик; 5 — кальдеры (на врезке): 1 — Карымского центра; 2 — массива Большой Семячик; 3 — Узон-Гейзерного района. Прямоугольником в верхнем левом углу рисунка отмечен район, показанный на рис. 3

отношения с другими породами были детально изучены нами в верховьях Пятой речки. Они показаны на рис. 3, на котором также видно, что в южном направлении игнимбриды перекрыты более молодыми лавами и значительная часть этих отложений в настоящее время недоступна для изучения. По имеющимся данным мы можем лишь предполагать, что пирокластические потоки, из которых сформировались игнимбриды, распространялись здесь в виде двух широких рукавов. Потоки вначале вытекали из кальдеры на северо-восток, а затем постепенно отклонились к востоку, юго-востоку, а на побережье — к югу и юго-западу (см. рис. 1).

Следует отметить, что если раньше возраст семячикских игнимбридов давался в очень широких пределах (от среднего до позднего плейстоцена [8, 9]), то сейчас его можно обозначить более точно. Палеомагнитный анализ отобранных нами образцов показал, что пласт На семячикских игнимбридов имеет обратную намагниченность. В период от 130—140 (возраст последних порций карымских игнимбридов [6]) до 40 тыс. лет (возраст узонских игнимбридов [7]) был только один экскурс геомагнитного поля (Блейк), возраст которого определен в 113 тыс. лет. По-видимому, пласт На семячикских игнимбридов был сформирован именно в это время. Залегающие выше (между пластами II и III) ледниковые отложения первой фазы верхнеплейстоценового

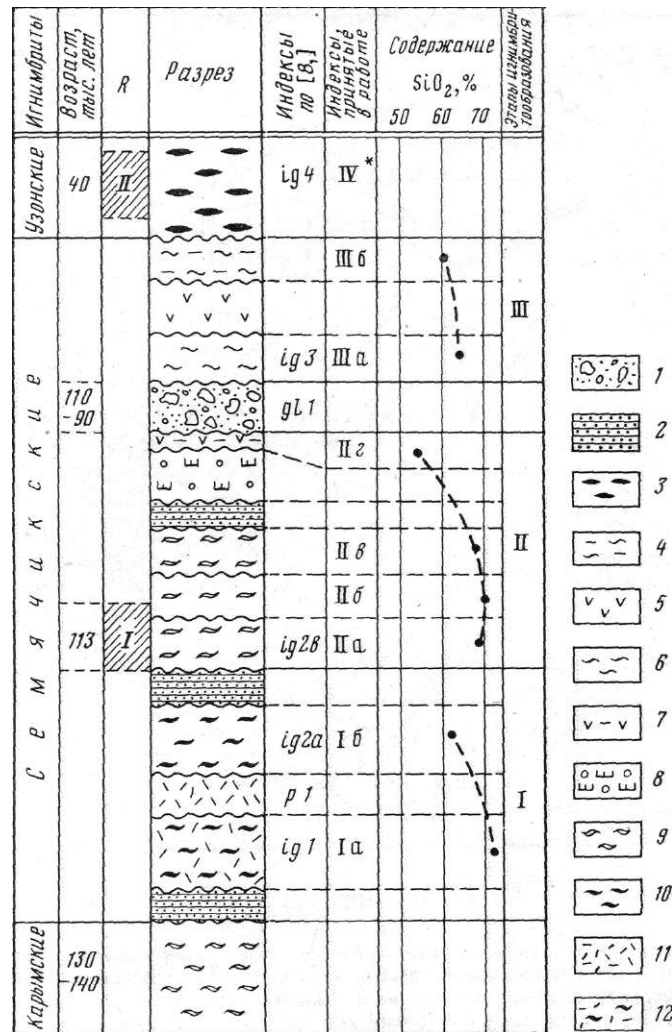


Рис. 2. Сводная стратиграфическая колонка игнимбридов, вскрытых на рассматриваемой территории. R — зоны обратной полярности магнитного поля: I — Блейк (113 тыс. лет), II — Олби-Лашам (35—44 тыс. лет). IV* — игнимбриды четвертой остывшей единицы [8] берегового разреза, в отличие от предыдущих исследователей рассматриваются нами как часть толщи узонских игнимбридов (см. текст). 1 — ледниковые отложения, валунники, галечники; 2 — слоистые озерные отложения: пласт, лежащий между зонами Блейк и Олби-Лашам, содержит туфобрекчии; пласт, непосредственно подстилающий зону Блейк, содержит пемзы и шлаки почвы; 3 — игнимбриды; 4 — то же, андезитового состава; 5 — лавы андезитового, дацитового состава; 6 — игнимбриды дацитового состава; 7 — игнимбридоподобные породы андезитобазальтового состава; 8 — агломератовые шлаковые туфы; 9 — игнимбриды риолитодацитового состава; 10 — игнимбриды андезитодацитового, дацитового состава; 11 — неспекшие пемзовые отложения; 12 — игнимбриды риолитового состава

оледенения, по данным В.А. Зубакова [4], имеют возраст 110—90 тыс. лет (время кульминации оледенения в высоких широтах Северного полушария). Таким образом, возраст пласта II семячских игнимбридов можно оценить довольно точно — 110—113 тыс. лет. Немного моложе игнимбриды третьего этапа (III а, б), возраст которых, по-видимому, ~ 80—90 тыс. лет.

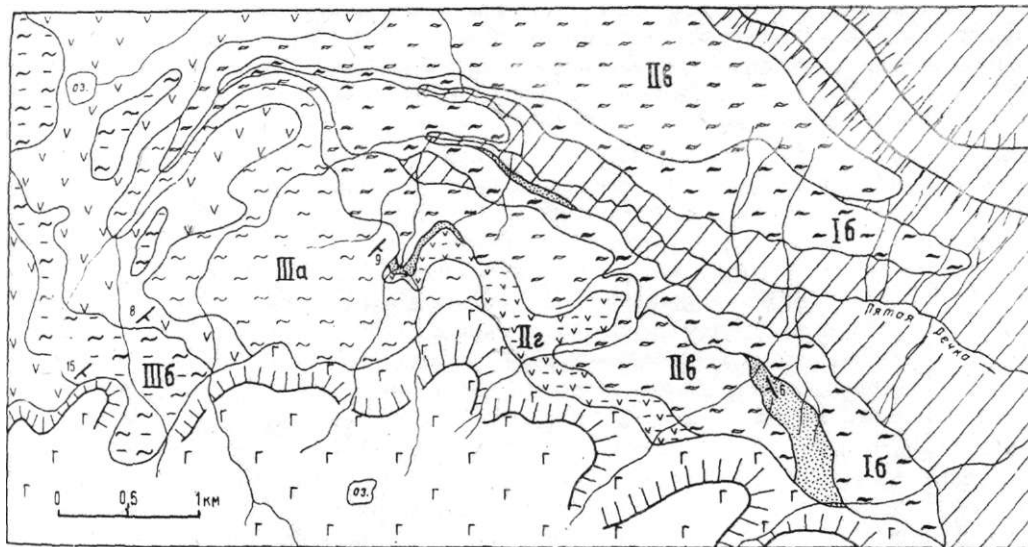


Рис. 3. Схема распространения семячских игнимбритов в верховьях р. Пятая речка. 1 — лавы базальтового состава, связанные с посткальдерным вулканом Большой Семячик (Зубчатка); 2 — игнимбриты пласта IIIб; 3 — лавы андезитового и дацитового состава, разделяющие верхние пласты игнимбритов; 4 — игнимбриты пласта IIIа; 5 — игнимбритоподобные породы андезитобазальтового состава (IIг); 6 — слоистые туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты, разделяющие отдельные пласты игнимбритов; 7 — игнимбриты второго пласта (IIв); 8 — игнимбриты первого пласта (Iб); 9 — отложения, составляющие фундамент толщи игнимбритов (лавы базальтового, андезитового состава, их туфы); 10 — крупные эрозионные уступы (а), элементы залегания (б)

Описание разрезов игнимбритов

Игнимбриты берегового разреза. К наиболее ранним относятся игнимбриты риолитового состава (первая остывшая единица по [8]), которые периодически встречаются в основании береговых обрывов, начиная от Пятой речки до северного мыса бух. Двойной (см. рис. 1, табл. 1). Это светло-серые белесые породы риолитового состава, характерной особенностью которых является присутствие в них вкрапленников кварца. Они отличаются относительно высокой степенью кристалличности (табл. 2) и неравномерным распределением кристаллической фазы. Основная масса состоит из стекловатых пепловых частиц сложной конфигурации в слабоспекшихся туфах верхней части разреза и более уплощенных тонковолокнистых — в зонах повышенного спекания. Степень девитрификации игнимбритов значительная. Редкие пемзовидные фьямме полностью перекристаллизованы в кварц-полевошпатовый агрегат. С этими игнимбритами по времени связаны, вероятно, пемзы с кварцем и биотитом, встречающиеся изредка в основании береговых обрывов, и слабо спекшиеся игнимбриты аналогичного состава на юго-западе района (р. В. Стан).

На южном мысе бухты Пятой речки, в бухточке между речками Пятой и Тундровой, а также на северном мысе бух. Двойной игнимбриты риолитового состава с кварцем перекрываются массивными темно-серыми игнимбритами андезитодацитового состава с дисковидными фьямме (см. табл. 1,2). Размер последних варьирует от долей миллиметра до «лепешек» диаметром 25—30 см и мощностью 10—15 см. Они представлены темно-бурым, коричневым плотным непросвечивающим стеклом с высоким содержанием кристаллической фазы. Обращает внимание высокое содержание в игнимбритах пироксена, скопления которого видны на выветрелых поверхностях. Предыдущие исследователи относили эти игнимбриты к нижнему потоку второй остывшей

Таблица I

Средние химические составы семячских игнимбритов (приведенные к 100%)

Окислы	Iп	Iа	Ю	IIа	IIб	IIв	IIг	IIIа	IIIб	Гетеротакситовые пемзы		IV	Фьямме	
										светлые полосы	темные полосы		Ю	Iа
SiO ₂	71,62	72,93	63,27	69,57	71,00	68,61	54,32	64,97	61,36	67,11	58,08	70,98	64,80	71,91
TiO ₂	0,40	0,39	0,86	0,66	0,63	0,71	1,31	0,89	1,02	0,81	1,09	0,66	0,86	0,62
Al ₂ O ₃	14,68	14,30	17,05	15,37	14,76	15,25	15,74	15,30	15,60	13,45	16,89	14,71	15,41	14,06
Fe ₂ O ₃	0,85	1,10	2,76	1,48	1,46	1,72	7,37	3,65	3,90	1,16	2,58	1,82	2,34	1,23
FeO	2,09	2,04	3,19	2,26	2,25	2,66	5,09	3,37	4,27	2,98	5,10	2,24	3,50	2,22
MnO	0,13	0,05	0,13	0,12	0,10	0,13	0,24	0,14	0,15	0,12	0,16	0,12	0,10	0,10
MgO	0,62	0,84	1,81	0,84	0,75	0,90	3,90	1,44	2,44	2,69	3,30	0,74	1,76	1,13
CaO	2,62	1,78	5,03	2,80	2,14	3,09	7,99	4,38	5,72	4,89	8,50	2,00	4,39	3,86
Na ₂ O	4,23	3,78	4,27	4,82	4,57	4,92	3,07	3,80	3,70	4,22	3,05	4,58	4,94	4,88
K ₂ O	2,76	2,76	1,64	2,07	2,33	2,01	0,96	2,06	1,84	2,54	1,28	2,14	1,89	2,57
n	2	6	6	9	4	4	1	6	3	1	1	3	2	1

Примечание. Iп — пемзы с кварцем и биотитом; Iа, Ю... IV — индексы потоков игнимбрит; n — количество анализов.

единицы [8]. Однако особенности состава и тесная пространственная взаимосвязь их с кварцсодержащими игнимбритами позволяют относить эти породы к одному I этапу игнимбриитообразования, который начинался извержением продуктов риолитового состава (1а) и завершился игнимбритами андезитодацитового состава (16).

Следующий этап начался извержением игнимбритов риодацитового состава, слагающих большую часть береговых обрывов (верхний поток второй остывшей единицы, по [8]). Непосредственные переходы между первой и второй фазами зафиксированы в разрезах на южном мысе бухты Пятой речки и в бух. Двойной. Среди игнимбритов этого этапа можно выделить по крайней мере два потока, которые имеют близкий состав. На м. Большом они перекрывают друг друга. Преобладают серые лавоподобные игнимбриты с заметной флюидалностью (IIа). Основная масса этих игнимбритов состоит из сплюснутых и сваренных пепловых частиц. В нижних частях разреза они почти полностью девитрифицированы, выше по разрезу, где степень девитрификации меньше, уплощенные пепловые рогульки представлены прерывистыми псевдофлюидалными фрагментами бурого тонкодисперсного стекла. Однородность размера пепловых частиц (0,3—0,5 мм) определяет лавоподобный облик семячковых игнимбритов [1,2]. Количество ксеногенного материала в них не превышает 5—8%, максимальный размер включений 2—3 см. Редкие фьямме в нижнем потоке почти полностью девитрифицированы, черное обсидианоподобное стекло сохраняется в крупных фьямме, но окружено серой девитрифицированной оторочкой.

Более молодой поток (IIб) представлен массивными стекловатыми разностями темно-серого цвета с редкими (не > 10%) мелкими включениями ксеногенного материала. По составу и объемному соотношению вкрапленников породы близки первым порциям, но отличаются относительно свежим обликом. Стекло основной массы этих игнимбритов плотное, имеет интенсивно бурую окраску и почти не подвержено девитрификации.

В бух. Нерпичьей темно-серые игнимбриты II этапа перекрыты ледниковыми отложениями, на которых лежит слой неспекшихся пемзовых туфов дацитового состава с прослоями гетеротакситовых пемз (см. табл. 1). Последние представляют собой начало следующего, III игнимбриитообразующего этапа. Игнимбриты III этапа (третьей остывшей единицы, по [8]) встречены в береговых обрывах от Первой до Третьей речки. На севере они лежат на светло-серых флюидалных игнимбритах IIа, а на юге перекрыты пемзовым пирокластическим потоком в. Проблематичный. Это сиреневые, сиреневато-серые игнимбриты с большим количеством обломочного материала — 15—20%. Состав обломков более разнообразен в сравнении с игнимбритами, описанными ранее, где преобладали в основном эффузивы. Здесь, помимо измененных, окисленных ксенолитов андезитов и базальтов, много обломков черных вспученных шлакоподобных и массивных стекол, игнимбритов, пемз. В менее спекшихся разностях встречаются пемзовые включения овальной и уплощенной формы с зазубренными краями, размер которых варьирует от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Пепловые частицы в основной массе очень мелкие и тонкие (не > 0,1 мм), не соприкасаются друг с другом, погружены в тонкую вулканическую пыль, почти изотропную. Более крупные пемзовые включения при сдавливании превращаются во фьямме красновато-бурого обсидианоподобного стекла с сохранившейся пемзовидной волокнистой структурой. В спекшихся разностях количество обломков снижается.

Игнимбриты риодацитового состава IV этапа (IV остывшей единицей, по [8]) являются самыми молодыми (см. табл. 1). Они развиты в северной части района от м. Большого до устья р. Шумной и представлены в основном темно-бурыми слабо спекшимися разностями, содержащими мелкие пемзовидные фьямме. Наиболее спекшиеся разности встречены в основании разреза южного мыса бухты р. Двойной, где они облекают игнимбриты IIа и представляют собой тонкоплитчатые лавоподобные породы, содержащие линзы пористых гомогенизированных стекловатых игнимбритов и редкие фьямме черного стекла. Игнимбриты отличаются наиболее низким содержанием кристаллической фазы (см. табл. 2) и почти не затронуты процессами девитрификации. Ксеногенные включения, мелкие (не > 1 см) и редкие (3—5%), представле-

Таблица I

Количественно-минералогический состав се.чячикских игнимбритов, %

Индексы потоков игнимбритов	Основная масса	P1	cPx	oPx	Mt	Q	Кристаллы
Ia	65	26	1,5	2,0	2,0	3,6	35
Иб	59	30	4,0	4,0	3,0	—	41
Ф	75	17	2,0	3,0	3,0	—	25
IIa	72	22	1,2	2,8	2,0	—	28
Ф	79	16	1,0	2,0	2,0	—	21
IIб	74	20	1,5	2,3	2,2	—	26
IIв	79	15	1,7	2,6	2,7	—	21
IIг	93	4	0,6	1,4	1,0	—	7
IIIa	70	19	3,7	3,5	2,8	—	30
IIIб	61	28	3,5	4,2	3,3	—	39
IV	86	10	0,5	1,5	2	—	14

Примечание. Ф — фьямме.

ны окисленными лавами преимущественно андезитового состава, шлакоподобными стеклами и редкими обломками фельзитов.

Игнимбриты среднего течения и верховий Пятой речки (см. рис. 1, 3). Отложения пирокластических потоков, распространявшихся в сторону океана, наиболее глубоко береглены Пятой речкой. Игнимбриты первого и второго этапов, слагающие береговые обрывы Кроноцкого залива, распространены вверх по течению на расстояние до 7 км. Далее они размты и вновь вскрыты уже в верховьях Пятой речки (см. рис. 3). Здесь можно выделить пять пластов игнимбритов, которые хорошо читаются в рельефе.

Первый пласт представлен темно-серыми массивными игнимбритами дацитового состава. Это стекловатые, в значительной степени сваренные игнимбриты с высоким содержанием кристаллической фазы, в частности клинопироксена. По составу они сопоставимы с игнимбритами андезитодацитового состава, завершающими первый этап игшшбритообразования (16).

Второй пласт представлен темно-серыми лавоподобными игнимбритами риодацитового состава с небольшим количеством ксеногенных включений и выраженной флюидальной текстурой. Они либо непосредственно перекрывают первый пласт, либо залегают на слоистых озерных отложениях. Эти игнимбриты коррелируются с потоками IIIa и IIIб второго этапа береговых разрезов и выделены нами как поток Ив.

Третий пласт представлен маломощным (1—2 м) слоем игнимбритоподобных пород состава основного андезита, андезитобазальта (см. табл. 1). Это темно-серые субафирные породы, состоящие из вспененного тонкодисперсного стекла с редкими микролитами. Единичные вкрапленники представлены плагиоклазом, пироксеном, реже оливином. Отличительной особенностью этих пород является присутствие мелких (не > 2 см) осветленных обломков, состоящих из перекристаллизованного кварц-чоловошпатового агрегата и слабоизмененных обломков андезитов, реже базальтов. Встречаются также развальцованные включения андезитового состава. Между игнимбритами второго и третьего пластов развиты слоистые туфы, переходящие местами в неспекшиеся пемзы и шлаки. Мощность их 4—5 м. Игнимбритоподобные субафирные породы являются маркирующим горизонтом, который тонким пластом покрывает значительную по площади территорию. Подобные породы встречены в виде метрового слоя среди игнимбритового разреза на Горном плато в верховьях руч. Ключ Короткий. Ими заканчивается этап извержения игнимбритов риодацитового состава. Этому горизонту присваивается индекс II г.

Игнимбриты четвертого пласта лежат непосредственно выше игнимбритоподобных пород. В среднем течении Пятой речки это сиреневато-серые игнимбриты дацитового состава с тонкими микрофьямме черного пористого стекла. Стекло отличается «звездчатым» рисунком раскристаллизации, который определяется кристаллитами темноцветных минералов. Эти игнимбриты слагают водораздельные участки между правыми притоками Пятой речки. По составу они коррелируются со слабоспекшимися игнимбритами сиреневого цвета с пемзовидными фьямме, слагающими береговые обрывы на участке от Первой до Второй речки (IIIa).

Самый верхний, пятый, пласт игнимбрита в этом разрезе имеет незначительный объем и развит в непосредственной близости от края кальдеры (верховья Пятой речки и руч. Безымянного). Он отличается значительной неоднородностью: помимо фьямме мевидных включений бурых стекол дацитового состава в породах здесь присутствуют; включения шлаков андезитобазальтового состава. Последние определяют пестроцветную окраску игнимбритов и андезитовый их состав; мелкие включения часто развальцованы. Этому потоку присвоен индекс IIIб (см. табл. 1). Пирокластические потоки IIIa и IIIб разделены серией лавовых потоков андезитового и дацитового состава.

Распределение и состав минеральных фаз

При извержении и транспортировке пирокластических потоков происходит перераспределение слагающих их компонентов и, в частности, отсеивание легкой стекловатой пепловой фракции, что приводит к концентрации фенокристаллов в игнимбритах [15]. Наиболее высокое содержание кристаллической фазы (30—41%) отмечено в игнимбритах I и III этапов (см. табл. 2). При этом количество вкрапленников возрастает к концу каждого из этих этапов в андезитовых разностях. В риодацитовых игнимбритах II этапа степень кристалличности меньше (21—28%), при этом снижается в каждом последующем потоке.

Фенокристаллы в игнимбритах распределены крайне неравномерно, образуя скопления, особенно характерные для игнимбритов Ia и Ib. В риолитовых игнимбритах концентрируются калиевые минералы, а в перекрывающих их андезитовых разностях в осветленной девитрифицированной массе даже макроскопически видны скопления крупных фенокристаллов пироксена.

Более точное представление о содержании кристаллов в расплаве дают фьямме, представляющие собой относительно крупные и цельные его фрагменты. Для тех случаев, где удалось просчитать количество вкрапленников в крупных фьямме (Ib и IIa), различия в содержании фенокристаллов в фьямме и в основной массе составляют 7—16%, т.е. отмечается заметная сегрегация вкрапленников в пепловом потоке.

Игнимбритоподобные породы андезитобазальтового состава (IIIг) и игнимбриты IV этапа отличаются минимальным (7—14%) содержанием фенокристаллов.

Среди минералов-вкрапленников преобладает ассоциация: плагиоклаз, орто- и клинопироксены, соотношение и состав которых меняются по разрезу. Исключение составляют самые ранние игнимбриты (Ia) и связанные с ними пемзы, в которых наряду с плагиоклазом развит кварц. В виде единичных зерен в игнимбритах IIIa встречается зеленая роговая обманка, а в кварцсодержащих пемзах в качестве темноцветного минерала присутствует биотит. В игнимбритах андезитового состава и игнимбритоподобных породах (IIIг) встречаются также единичные неравновесные зерна оливина.

Составы минеральных фаз определены на микроанализаторе Camebax

Плагиоклаз является ведущим минералом-вкрапленником. Состав его варьирует в пределах 26—87% An. При этом в потоках риолитового и риодацитового состава преобладают олигоклаз-андезины (25—35% An), а в потоках дацитового и андезитового состава — андезин-лабрадор и Лабрадор (45—60% An). Следует отметить довольно узкий диапазон состава вкрапленников в игнимбритах I этапа: как в кварцсодержащих риолитах, так и в андезитах (рис. 4). Вкрапленники незональные или слабозональные.

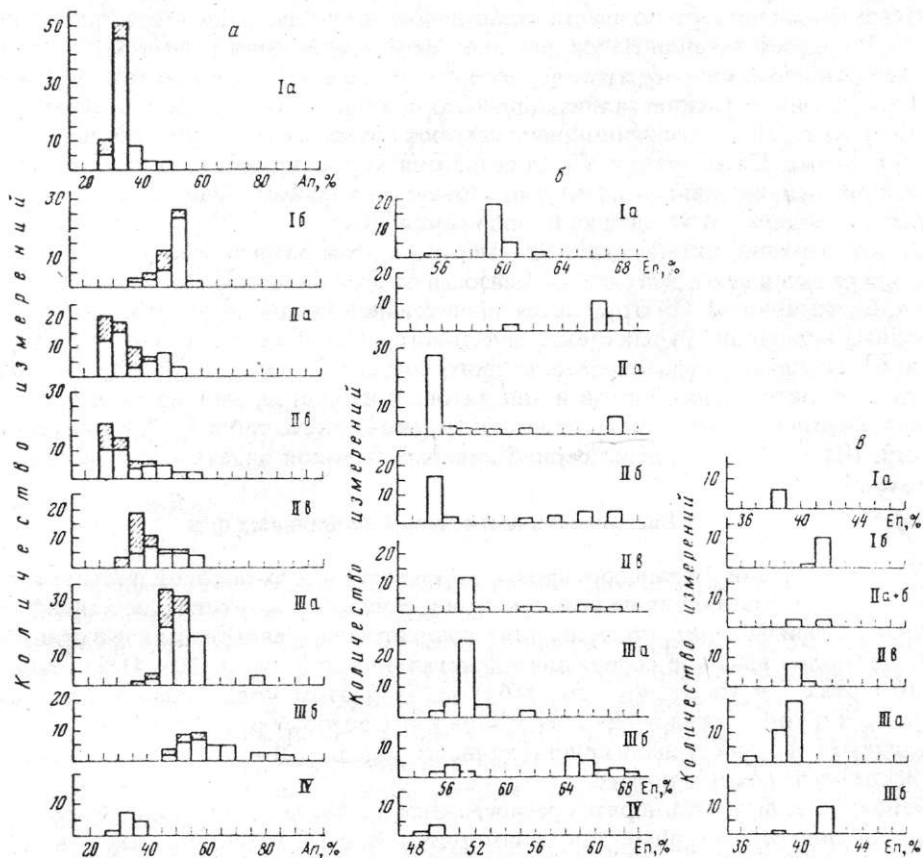


Рис. 4. Распределение минеральных фаз по составу: а — плагиоклаза, % An ; б — ортопироксена, % En (энстатитовый минал); в — клинопироксен, % En

В плагиоклазах игнимбритов I6 преобладающий состав ядер — 50—58% An, внешних зон — 30—48% An. Встречаются также фенокристаллы, ядерные зоны которых имеют состав (30—36% An), аналогичный составу вкрапленников в кварцсодержащих игнимбригах. В риодацитовых игнимбригах II этапа диапазон состава плагиоклаза расширяется как в сторону натриевых, так и кальциевых составов. При этом можно выделить три группы вкрапленников с составом ядер 29—35% An, 39—45% An и 52—57% An. Во внешних зонах кристаллизуется андезин 30—44% An. В потоке IIв, в верховьях Пятой речки, преобладают фенокристаллы второй группы. Среди них появляются вкрапленники с обратной зональностью. Средний состав плагиоклаза в каждом последующем потоке становится все более кальциевым, соответственно 35, 38, 44% An.

Для плагиоклазов игнимбритов III этапа характерна проявляющаяся бимодальность их состава (см. рис. 4, а). Наряду с преобладающим составом 45—60% An появляются высококальциевые фенокристаллы (75—87% An). Количество их возрастает в потоке IIIб, где они явно связаны с включениями андезитобазальтовых шлаков. Заметно усложняется зональность фенокристаллов. Если до этого в игнимбригах плагиоклазы

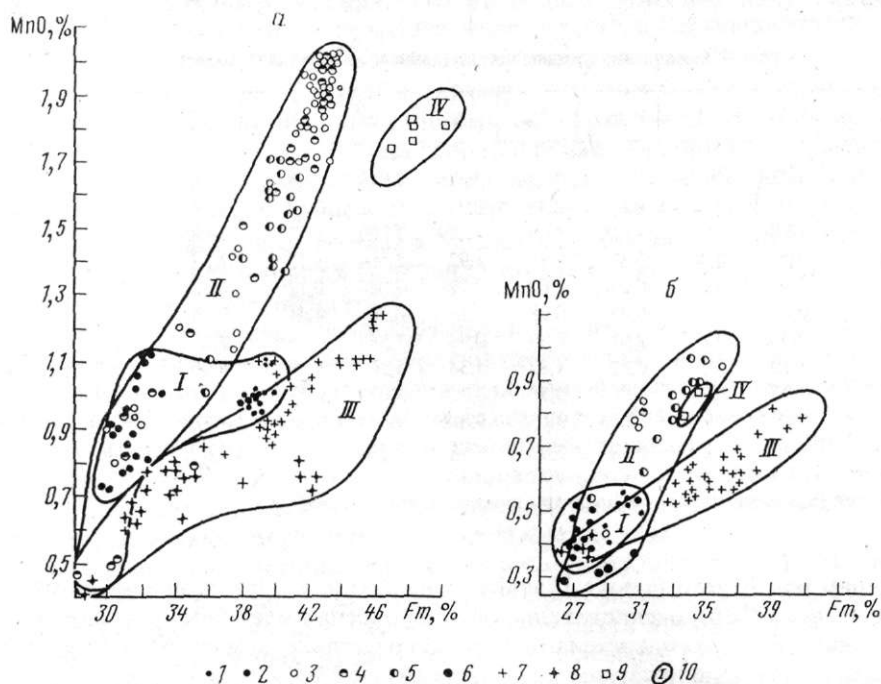


Рис. 5. Содержание марганца в орто- (а) и клинопироксенах (б) в зависимости от железистости минералов. I, II, III, IV — игнимбритообразующие этапы. Пироксены игнимбритов: 1 — риолитового состава, Ia; 2 — андезитодацитового состава, Ib; 3—5 — риодацитового состава, IIa, в; 6 — игнимбритоподобных пород андезитобазальтового состава, IIг; 7 — дацитового состава, IIIa; 8 — андезитового состава, IIIб; 9 — риодацитового состава, IV; 10 — границы полей пироксенов по этапам игнимбритообразования

отличались слабой и простой зональностью, то в породах потоков IIIa и IIIб появляются вкрапленники со сложноповторяющейся зональностью во всем диапазоне составов. Высококальциевые плагиоклазы встречаются как в ядрах, так и в промежуточных зонах. Средний состав фенокристаллов в потоках III этапа составляет соответственно 54 и 60% An. Таким образом, начиная со II этапа, в каждом последующем потоке основность среневзвешенного плагиоклаза повышается.

Кварц встречается в самых ранних и самых кислых по составу порциях игнимбритов. В пемзовых туфах он ассоциирует с биотитом, а в игнимбритах Ia — с пироксеном. Изредка пироксен совместно с титаномагнетитом встречается в виде вrostков во внешних зонах вкрапленников кварца и ксеноморфен по отношению к последнему.

Пироксен по разрезу игнимбритов распределен неравномерно: в потоках дацитового (IIIa) и андезитового (Ib и IIIб) состава его количество существенно возрастает (см. табл. 2). Ортопироксен представлен преимущественно гиперстеном, являющимся главным темноцветным минералом в кислых игнимбритах. В игнимбритах I этапа диапазон состава гиперстена довольно узок (см. рис. 4, б) и изменяется от магнезиально-железистого гиперстена (59—61% En, $fm = 38—40\%$) в кварцсодержащих игнимбритах (Ia) до магнезиальных разностей (66—68% En, $fm = 30—33\%$) в потоке андезитового состава (Iб). Ортопироксен в игнимбритах риодацитового состава II этапа отличается бимодальным распределением по содержанию энстатитового минала и значительными его вариациями (55—68% En, $fm = 30—44\%$). Преобладают существенно железистые гиперстены. В первых двух потоках состав их близок (55—56% En), но в IIв возрастает доля относительно магнезиальных разностей.

В игнимбритовом потоке дацитового состава в начале III этапа развит преимущественно железистый гиперстен (57—58% En, $fm = 39—46\%$), близкий по составу

Таблица I

Средние химические составы стекол (данные микрозондового анализа)

Оксиды	Iп	Iа	Iб	IIа	IIб	IIв	IIIа	IIIб _I	IIIб _{II}	IV
SiO ₂	74,78	76,29	74,18	76,38	76,76	76,49	71,83	72,67	67,70	73,99
CO ₂	0,0	0,0	0,50	0,34	0,22	0,55	0,52	0,53	0,55	0,34
Al ₂ O ₃	12,03	11,59	13,00	11,44	11,99	13,29	13,68	14,85	14,63	12,98
FeO	0,52	0,30	2,38	2,88	1,92	2,16	3,58	2,23	5,08	2,20
MnO	0,07	0,0	0,03	0,03	0,02	0,08	0,12	0,11	0,10	0,07
MgO	0,0	0,0	0,45	0,28	0,16	0,26	0,41	0,26	1,46	0,23
CaO	0,036	0,27	2,01	0,59	0,94	1,56	2,43	2,83	3,23	1,07
Na ₂ O	3,10	3,00	4,32	4,82	4,33	5,28	4,50	4,71	5,02	4,40
K ₂ O	5,35	6,03	2,96	2,58	3,55	2,07	2,77	2,37	1,69	3,88
Σ	96,98	97,48	92,83	99,35	99,89	99,74	99,84	100,56	99,36	99,16
Na ₂ O + K ₂ O	8,45	9,03	7,28	7,40	7,88	7,35	7,27	7,08	6,71	8,28

Примечание. Римскими цифрами обозначены индексы потоков игнимбритов.

гиперстенам последнего потока II этапа. В наиболее основных игнимбритах, завершающих III этап (IIIб), распределение ортопироксена имеет бимодальный характер. Наряду с железистыми гиперстенами широко представлены магнезиальные разновидности, некоторые из них приближаются к бронзиту (68—69% En, *fm* = 29—30%) и связаны с включениями шлаков андезитобазальтового состава. Наиболее железистый гиперстен (48—50% En, *fm* = 49—50) наблюдается среди редких кристаллических фаз в слабоспекшихся игнимбритах IV (см. рис. 4, б). По составу они приближаются к феррогиперстенам.

Ортопироксены семячковых игнимбритов существенно развигачаются по содержанию марганца (рис. 5). Существует прямая зависимость содержания этого элемента от железистости пироксена и валового химического состава игнимбритов. Происходит снижение содержания марганца к концу каждого этапа, и эта закономерность согласуется с составом игнимбритов. Наиболее высокие значения MnO (1,5—2%) наблюдаются в ортопироксенах игнимбритов риодацитового состава (IIа—б). Для них характерны и наиболее широкие вариации этого элемента. При этом отмечается снижение MnO в каждом последующем потоке. Для игнимбритоподобных андезитобазальтовых пород, завершающих II этап (IIг), нет данных о составе ортопироксена, однако отмеченная зависимость распределения марганца в пироксенах подтверждается на примере клинопироксена.

Содержание Mn в гиперстенах наиболее ранних кварцедержащих игнимбритов (Iа) довольно постоянно (0,95—1,1%) и, несмотря на наиболее кислый (риолитовый) валовой состав породы, они более близки пироксенам из потоков дацитового состава (IIIа). При сходных содержаниях марганца гиперстены из потоков андезитодацитового (Iб) и дацитового (IIIа) состава значительно различаются по степени железистости, которая выше в последних. Наиболее низкие содержания (0,40—0,50%) определены в магнезиальных гиперстенах из риодацитового потока IIб и андезитового потока IIIб.

Вкрапленники гиперстена большей частью незональны, однако в некоторых из них, особенно в пироксенах игнимбритов III этапа, во внешних зонах возрастает содержание ферросилитового минала. Магнезиальные гиперстены, а также гиперстены игнимбритов Iа отличаются пониженным содержанием волластонитового минала.

Клинопироксен представлен преимущественно авгитом. В зависимости от состава игнимбритов меняется и соотношение основных компонентов в клинопироксенах. Августы из риодацитовых (IIа—в) и дацитовых (IIIа) потоков близки по составу и отличаются несколько большей железистостью последних (см. рис. 4, в). Клинопироксены потоков первого и конца третьего этапов отличаются повышенным

содержанием кальция и магния, что позволяет относить их к салит-авгитам ($f_m = 27—30\%$). Характер соотношения железистости и марганцовистости в клинопироксенах аналогичен отмеченному для гиперстенов (см. рис. 5).

Рудные минералы представлены титаномагнетитом и ильменитом. Они встречаются в виде отдельных зерен и полиминеральных сростков. Титаномагнетит кое-где содержит фигуры распада, бывает корродирован. Содержание окиси титана в однородных зернах его составляет **3—18%**, в ильмените — **42—44%**. Преобладают титаномагнетиты с содержанием **9,5—13,0% TiO_2** . Они в основном характерны для игнимбритов риодацитового состава и отличаются повышенным (**0,8—1,4%**) содержанием марганца. В игнимбритах III этапа, а также в 16 количество этих элементов в Fe—Ti-окислах существенно ниже.

Из аксессуарных минералов присутствует апатит. Он образуется на последних стадиях кристаллизации расплава и образует идиоморфные призматические кристаллы размером 0,04—0,06 мм. Встречается в основной массе, а также прирастает к внешним граням вкрапленников плагиоклаза, пироксена, магнетита в игнимбритах среднего состава (16, Ша,б). В кварцсодержащих игнимбритах (1а) встречен циркон.

Необходимо отметить, что состав минералов-вкрапленников очень выдержан в отдельных потоках игнимбритов, служит хорошим минералогическим корреляционным признаком, позволяющим сопоставлять отдельные разрезы.

Стекло. Пепловые частицы и фьямме игнимбритов представлены вулканическим стеклом. Цвет и плотность его в шлифе определяются составом, структурой и степенью спекания пепловых частиц. В игнимбритах кислого состава однородное стекло фьямме и пепловых частиц окрашено в палевые и светлые желтовато-бурые тона. Уплотненные пепловые частицы окружены тонкой (доли мм) каймой рудной пыли. С увеличением степени сплющивания и спекания пепловых частиц стекло игнимбритов становится бурым, но сохраняет псевдофлюидальную структуру. В игнимбритах андезитового состава стекло фьямме плотное, непросвечивающее, имеет интенсивно бурю окраску.

Состав стекловатых фрагментов в игнимбритах определялся на микроанализаторе. В результате ранней потери летучих, вторичного преобразования стекол, поровой пневматолитовой кристаллизации полевых шпатов и кварца, он не всегда соответствует составу магматической жидкости. Наиболее подвержены колебаниям содержания кремнекислоты и щелочей. В табл. 3 приведены средние химические анализы однородных недевитрифицированных стекол, которые могут отражать изменение их состава по разрезу игнимбритов. Содержание кремнекислоты в них варьирует от 76,3 до 67,7%. Кислые стекла обычно маложелезистые, малотитанистые с относительно низким содержанием Al_2O_3 . Исключение составляет стекло игнимбритов Ив, отличающихся повышенной глиноземистостью. Близко к нему по составу вулканическое стекло игнимбрита, сформированного в конце I этапа. Минимальные параметры этих компонентов отмечены в стеклах кварцсодержащих игнимбритов риолитового состава.

Для остаточных расплавов игнимбритов III этапа характерны повышенные железистость и глиноземистость. При этом в последнем потоке отмечены два типа стекла. Первый тип (более кислое стекло) по составу близок остаточным расплавам первого потока (см. табл. 3), а второй отличается высоким содержанием железа, магния и низким — SiO_2 . (67,7%). Он связан с включениями шлаков андезитобазальтового состава, которые видны в этих игнимбритах макроскопически, придавая им пестроцветную окраску.

Общая щелочность остаточных стекол игнимбритов варьирует в пределах 6,7—9,0%, снижаясь от I этапа, где стекла наиболее калиевые, к III этапу.

Условия образования игнимбритов

Температура и фугитивность кислорода (f_{O_2}) игнимбритообразующих расплавов оценивались по геотермометрам. По сосуществующим парам Fe-Ti окислов (ильменит — титаномагнетит), равновесных с расплавом [11], рассчитаны температуры для игнимбритов риодацитового состава. Они образуют ряд значений — 875—950°C. Фугитивность кислорода для этих расплавов равна 11,6—11,9. Точки на графике (рис. 6, а) $\lg f_{O_2} = 7^\circ\text{C}$ ложатся вблизи кривой для кислородного буфера NNO, которая соответствует кислым вулканитам, содержащим ортопироксен [12], это свидетельствует об относительной «сухости» расплава. По двупироксеновому геотермометру [16] были оценены температуры кристаллизации вкрапленников (984—1046°C) почти для всех пирокластических потоков (см. рис. 6, б). Минимальные температуры получены для игнимбритов риодацитового состава (они сопоставимы со значениями, полученными по магнетит-ильменитовому геотермометру), максимальные (1020—1046°C) — для игнимбритов андезитового состава. Существование двух типов контрастных расплавов (дацитового и андезитобазальтового состава) в игнимбритах Шб подтверждается и присутствием низко- и высокотемпературных пар пироксенов в них. Последние изредка встречаются и в игнимбритах риодацитового состава (Пб).

Состав флюидальной фазы игнимбритов. Плагноклаз-пироксеновая ассоциация минералов-вкрапленников в семьячских игнимбритах свидетельствует о низком содержании легкорастворимых летучих (в частности, H₂O) в игнимбритообразующем расплаве. Из монофракций кварца, плагноклаза и пироксена на масс-спектрометре был сделан качественный анализ газов, окклюдированных в минералах при ступенчатом нагреве до 1000°C, с интервалом 100°C (аналитик А.Ю.Поляков, ИВ ДВО РАН). Анализ их показывает, что при нагреве до 600°C количество летучих было незначительно. В составе их преобладали окисленные газы H₂O и CO₂. В интервале температур от 600 до 900°C количество выделяющихся газов начинает возрастать более заметно, затем при 1000°C резко и повсеместно их выделения увеличиваются (рис. 7). Отмечается инверсия в составе газов. Резко возрастает роль газов с массой 28: N₂ и CO. Так как CO в магматических газах всегда присутствует в виде примесей, этот пик, по-видимому, можно отнести к азоту. Азот преобладает почти во всех экспериментах и минеральных фазах, за исключением пироксена игнимбритов 1б. Необходимо отметить, что в пироксенах и кварце в сравнении с плагноклазом роль окисленных газов более значительна. В плагноклазах вода или вовсе не определяется (1б), или присутствует в значительно меньшем объеме. В кварце 1а и минеральных фазах игнимбритов П1а, помимо перечисленных газов, в незначительных количествах определяется SO₂.

Таким образом, качественный анализ газов в игнимбритах свидетельствует, что на ранних этапах кристаллизации вкрапленников (в первую очередь плагноклаза) флюидная фаза имела сравнительно восстановительный характер. Коэффициент окисленности <1. Степень окисленности его возрастала со снижением температуры, достигая максимума на стадии пневматолитовой и гидротермальной кристаллизации. Роль CO₂ среди окисленных газов значительна.

Состав игнимбритообразующего расплава. Существование в разрезе серии пластов игнимбритов, разделенных значительными временными интервалами, свидетельствует о длительном развитии вулканотектонической структуры Большого Семьячика. Игнимбриты, связанные с ней, отличаются значительной неоднородностью, состав их изменяется от риолитов (71—73% SiO₂) в начальный период извержения до андезитов (59—61% SiO₂). Изменение состава игнимбритов отражается также в смене минеральных парагенезисов. Среди них можно выделить следующие ассоциации: 1) Q + Pl_{23_28} + Vi + Mt + Ilm (пемзовые туфы, слабо спекшиеся игнимбриты р. В. Стан, In); 2) Q + Pl_{30_40} + oPx_{38_40} + cPx_{29_31} + Mt + Ilm (кварцсодержащие игнимбриты, 1а); 3) Pl_{23_36} + oPx_{38_43} + cPx_{33_35} + Mt + Ilm (пирокластические потоки риодацитового состава, На,б,в); 4) Pl_{4s_55} + oPx_{39_46} + cPx_{33_41} + Mt + Ilm (игнимбриты Ша);

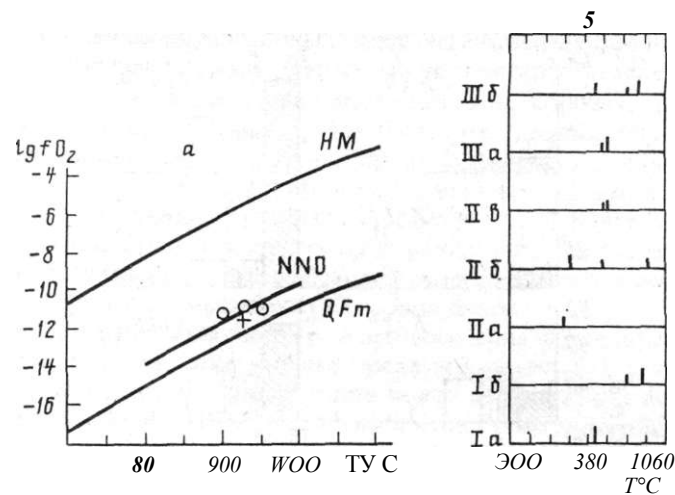


Рис. 6. Температура игнимбритов, рассчитанная по геотермометрам:
 а — магнетит-ильменитовому [12]; б — дупироксеновому [16]

- 5) $P1_{45-55} + oPx_{30-35} + cPx_{7-28} + Mt + Pm$ (игнимбриты 16, Шб, частично На,б);
 6) $P175-8S + oPx_{2g-30} + cPx_{26-2g} + Mt$ (игнимбриты Шб, частично Иб).

Вероятно, минеральные парагенезисы кристаллизовались из разных по составу расплавов. Подтверждается это и распределением марганца в пироксенах. Видна прямая зависимость содержания его от валового состава пород. По содержанию марганца в гиперстенах (см. рис. 5) можно выделить три группы. Первая, с минимальным его количеством (0,4—0,5%), связана с развальцованными включениями андезито-базальтов в игнимбритах. Вторая группа с содержанием марганца 0,6—1,1% объединяет игнимбриты андезитового и дацитового состава (16, Ша, Шб). Она включает также кварцсодержащие игнимбриты, пироксены которых близки по составу вкрапленникам игнимбритов IIa. В третью группу с максимальным количеством марганца в гиперстенах попадают спекшиеся туфы риодацитового состава (На—в).

Характер изменения химизма игнимбритов внутри каждого этапа, смена минеральных ассоциаций по разрезу, существование различных по составу стекол и гетеротакситовых пемз свидетельствует о том, что в недрах структуры Большого Семьячика в верхнем, плейстоцене существовал, вероятно, зональный коровый магматический очаг. Судя по преобладанию андезитов в докальдерной постройке вулканического массива, первоначальный состав расплава в очаге отвечал диориту. Возникновение зональности в очаге может быть связано с механизмом фракционной сепарации кристалл — жидкость [13]. Согласно этому механизму, кристаллизация расплава в очаге на боковых поверхностях и в кровле приводит к отжиманию и всплыванию остаточных жидкостей с низкой плотностью и формированию шапки высококремнистых расплавов, обогащенных щелочами и водой. Кварцбиотитовые пемзовые туфы, слабоспекшиеся игнимбриты р. В. Стан, а также кварцсодержащие игнимбриты Ia, находящиеся в основании разреза семьячских игнимбритов, отражают, вероятно, состав этой зоны. Встречающиеся иногда в игнимбритах Ia агрегаты кварца, орто- и клинопироксена и магнетита могут представлять собой кристаллические фрагменты более основной по составу закристаллизованной кровли.

Ниже линзы высококремнистого расплава, судя по последующему извержению игнимбритов 16, существовал слой дацитового, андезитодацитового расплава, состав которого характеризуют дисковидные фьямме с 64,80% SiO_2 . Составы этих двух потоков (Ia, 16) сравнительно однородны и промежуточные разности отсутствуют, поэтому можно предполагать, что граница между двумя слоями была резкой и проис-

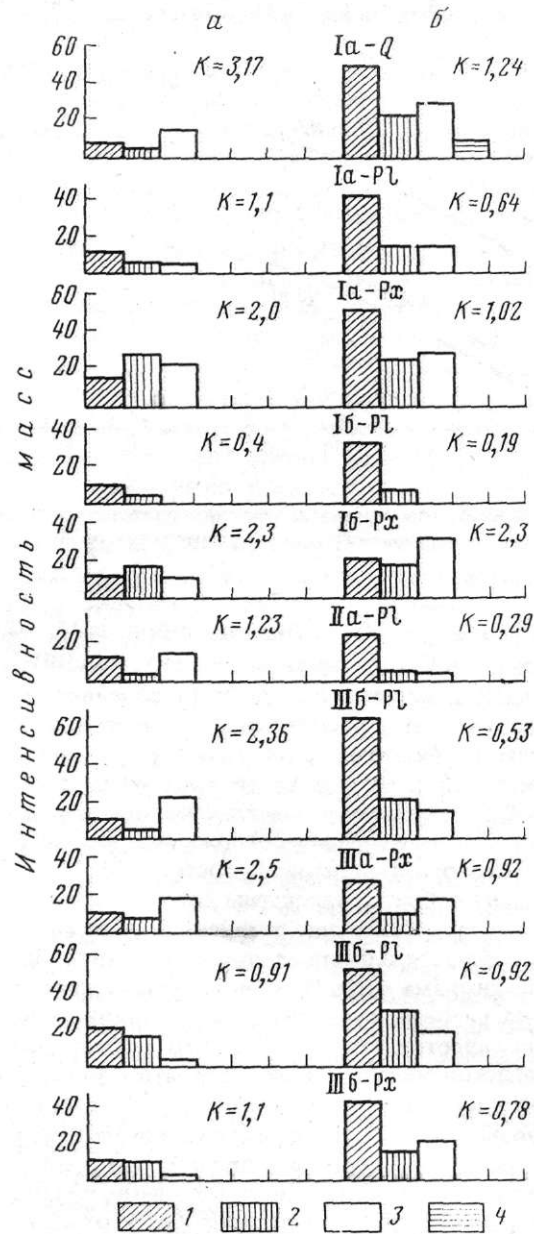


Рис. 7. Состав газов в монофракциях андезитов при температуре: а — 600°С; б — 1000°С; 1 — N, 2 — CO₂; 3 — H₂O; 4 — SO₂; К — коэффициент окисленности

ходило послыное дренирование очага. Относительно однородный состав вкрапленников плагиоклаза в игнимбригах I этапа свидетельствует о спокойных условиях кристаллизации расплава. Между I и II этапами существовал, по-видимому, значительный временной интервал, в течение которого нарушенная зональность в очаге восстановилась, но верхняя кислая зона приобрела уже риодацитовый состав. Снижение кислотности игнимбригов последнего риодацитового потока Пв, возрастание основности плагиоклаза в магнезиальности пироксена в каждом последующем потоке отражают процесс дренирования все более глубоких зон очага. В связи с извержением

в конце второго этапа игнимбритоподобных пород андезитобазальтового состава (54% SiO₂) предполагается существование другого *магматического* резервуара на более глубоких уровнях. Стратифицированная магматическая коровая камера обычно представляет собой плотностный барьер для базальтов, поднимающихся с глубин. Прорыв их на поверхность в данном случае связан, очевидно, с мощным эффектом газлифта (флюидной откачки) и опустошением верхней кислой зоны. Высокофлюидизированный базальтоидный расплав с примесью кислого материала отличался очень высокой подвижностью, так как распространился тонким слоем на большие расстояния. Широкий диапазон составов вкрапленников в кислых игнимбритах II этапа отражает, вероятно, процессы смешивания в коровом очаге.

Относительное истощение верхнего риолитового слоя в течение первых двух этапов и значительная конвекция в очаге *после* внедрения базальтов привели к выравниванию состава магмы и извержению после первой фазы верхнеплейстоценового оледенения в начале III этапа игнимбритов промежуточного дацитового состава. Отмечается незначительная стратификация их по химическому составу: самые нижние слои (первые порции) несколько обогащены кремнекислотой (66,7% SiO₂). В последнем потоке кислотность пород снижается вплоть до появления развальцованных шлаков андезитобазальтового состава. Состав слоев в коровом очаге может отражать также составы контрастных полос в гетерогенных пемзах из неспекшихся туфов, предваряющих III этап (см. табл. 1). Бимодальность минерального состава игнимбритов Шб, сложно повторяющаяся зональность плагиоклазов, одновременное присутствие кислых стекол и шлаков андезитобазальтового состава отражают как более ранние, так и возникавшие непосредственно во время извержения процессы смешивания расплавов.

Маломощное извержение игнимбритов IV риодацитового состава может означать начало следующего этапа. Однако отсутствие подобных игнимбритов вблизи кальдеры Большой Семячик и пространственное тяготение их к Узон-Гейзерной депрессии позволяет предположить, что они могут быть связаны с последней.

Таким образом, исходя из последовательной смены состава игнимбритов в течение одного этапа игнимбритообразования и в целом за весь период, можно предполагать, что происходит откачка расплава из стратифицированного магматического очага, верхняя часть которого имела *риолитовый* состав, а ниже состав менялся от андезиодацита до андезита. В основании очага из более глубоких промежуточных резервуаров поступали базальты, стимулируя извержение пирокластических потоков. Инъекции высокотемпературных базальтов в кислые коровые очаги являются, очевидно, одним из основных спусковых механизмов, приводящих к сильным эксплозивным извержениям [14]. Однородность пирокластических потоков объясняется послойным малообъемным дренированием зональных магматических камер, как в случае игнимбритов 1а и 1б. Для объяснения последовательного изменения состава в процессе извержения привлекается флюидная динамическая модель [10], которая предполагает подтягивание расплава из более глубоких зон очага с возрастанием гетерогенности его *свойств* (как в случае игнимбритов II и частично III этапов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Влодавец В.И.* О некоторых семячских туфолавах и их происхождении // Изв. АН СССР. Серия геол. 1953. Мс 3. С. 96—106.
2. *Влодавец В.И.* О происхождении пород, обычно называемых туфолавами и игнимбритами // Тр. Лаб. вулканологии АН СССР. 1957. Вып. 14. С. 3—16.
3. Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. 261 с.
4. *Зубаков В.А.* Глобальные климатические события плейстоцена. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 288 с.
5. *Малеев Е.Ф.* Семячские игнимбриты и проблемы туфолав // Вулканические фации Камчатки. М.: Наука, 1969. С. 91—104.

6. *Селянгин О.Б.* Петрогенез базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.
7. *Флоренский И.В.* К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102—106.
8. *Шеймович В.С.* Игнимбриты Камчатки. М.: Недра, 1979. 155 с.
9. *Шеймович В.С., Брайцева О.А., Краевая Т.С.* Четвертичные игнимбриты Семьячкского района на Камчатке // Кислый вулканизм. Новосибирск: Наука, СО, 1973. С. 110—120.
10. *Blake S.* Eruptions from zoned magma chamber // J. Geol. Soc. London. 1981. V. 138. P. 281—287.
11. *Buddington A.E., Lindsley D.H.* Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // J. Petrol. 1964. N 5. P. 310—357.
12. *Carmichall J.S.E.* The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates // Contrib. Mineral. Petrol. 1967. V. 14. P. 36—64.
13. *Miller G.F., Mittlefehldt D.W.* Extreme fractionation in felsic magmachambers: a product of liquid state diffusion of fractionat cristallisation // Earth and planet. Sci. Letters. 1984. V. 68. P. 151—158.
14. *Sparks S.R.J., Sigurdsson H.* Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruption // Nature. 1977. V. 267. P. 315—318.
15. *Walker G.P.L.* Crystal concentration in ignimbrites // Contrib. Mineral. Petrol. 1972. V. 36. P. 135—146.
16. *Wood B.J., Banno S.* Camet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple sna complex system // Contrib. Mineral. Petrol. 1973. V. 42. N 2. P. 109—124.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
9.12.1991