

УДК 551.21+552.11

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕТРОЛОГИЯ ЛАВОВОГО КОМПЛЕКСА ВУЛКАНА МОЛОДОЙ ШИВЕЛУЧ, КАМЧАТКА

© 2011 г. Н. В. Горбач*, М. В. Портнягин**, ***

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия; e-mail: n_gorbach@mail.ru

**Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

ул. Косыгина, 19, Москва, 119991, Россия

***Leibniz Institute of Marine Sciences (IFM-GEOMAR)

Wischofstr. 1-3, D-24148, Kiel, Germany; e-mail: mportnyagin@ifm-geomar.de

Поступила в редакцию 10.04.2010 г.

Получена после доработки 20.07.2010 г.

Проведено первое детальное геологическое и петролого-геохимическое изучение пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч. Оценен объем лавовых образований, определены относительная последовательность формирования постройки и минимальный возраст начала эруптивной деятельности. Лавы Молодого Шивелуча представлены преимущественно магнезиальными андезитами и андезибазальтами умеренно-калиевой известково-щелочной серии ($\text{SiO}_2 = 55.0\text{--}63.5$ мас. %, $\text{Mg\#} 55.5\text{--}68.9$). Геологические наблюдения, данные по минералогии и геохимии пород лавового комплекса позволяют сделать вывод, что магнезиальные андезиты вулкана Молодой Шивелуч имеют гибридное происхождение и представляют собой смесь кислых дифференциатов и высокомагнезиальной магмы, которая периодически пополняет близповерхностную магматическую камеру. Фракционная кристаллизация ассоциации плагиоклаза и роговой обманки при неполном отделении кристаллов плагиоклаза от фракционирующих магм приводит к появлению “адакитовых” геохимических характеристик ($\text{Sr/Y} = 50\text{--}71$, $\text{Y} < 18$ г/т) в наиболее дифференцированных разностях пород. Полученные результаты позволяют объяснить происхождение серии пород вулкана Молодой Шивелуч без привлечения модели плавления края субдуцирующей Тихоокеанской плиты.

ВВЕДЕНИЕ

Шивелуч – наиболее северный активный вулканический центр Камчатки (рис. 1а), привлекающий огромное внимание исследователей в силу ряда уникальных особенностей. Деятельность вулкана в голоцене, связанная с эруптивным центром Молодой Шивелуч, характеризуется мощными плинианскими извержениями и ростом экструзивных куполов. Масштабы и частота этих извержений делают этот вулкан наиболее активным эксплозивным центром Камчатки (Ponomareva et al., 2007). После Ключевского вулкана Шивелуч является вторым по продуктивности (36 млн. т/год), а по количеству изверженных андезитов не имеет аналогов среди четвертичных вулканов Курило-Камчатской островной дуги (Мелекесцев и др., 1991). Для него характерны магнезиальные андезиты, нетипичные для других активных вулканов Камчатки (Volynets, 1994). Сочетание уникальной геодинамической позиции (вулканический массив Шивелуч расположен на сочленении Курило-Камчатской и Алеутской дуг) и присутствие магнезиальных андезитов среди его изверженных продуктов послужило основанием для гипотезы о том, что вулкан питается продуктами плавления края Тихоокеанской плиты, субду-

цирующей под Северной Камчаткой (Yogodzinski et al., 2001; Churikova et al., 2001; Münker et al., 2001).

Несмотря на ключевое значение, которое отводится вулканическому массиву Шивелуч в современных моделях магмогенерации на Камчатке, в настоящее время известно немного данных о его геологическом строении, петрографии, минералогии и геохимии пород. Это не позволяет в полной мере протестировать альтернативные модели происхождения магм массива Шивелуч, например такие как модель смешения дифференцированных и примитивных магм в питающей системе вулкана, способную объяснить происхождение магнезиальных андезитов без привлечения плавления субдуцированной плиты (например, Streck et al., 2007).

В настоящей работе приводятся результаты детального изучения петрографии, минералогии и геохимии пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, которые основаны на проведенном нами систематическом полевом исследовании его постройки. Полученные данные свидетельствуют о широком развитии процессов смешения магм на современном этапе эволюции вулкана, что может объяснить его высокую активность и присутствие магнезиальных андезитов среди изверженных пород. “Адакитовые” геохимические особенности андези-



Рис. 1. Схема расположения вулканического массива Шивелуч.

(а) – общее положение; (б) – вид на вулкан с юга и его основные структурные элементы.

тов Молодого Шивелуча, низкое содержание Y и повышенное отношение Sr/Y объясняются фракционированием исходных базальтовых магм с участием амфибола в средне- и в верхнекоровых условиях.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика постройки вулкана

Вулканический массив Шивелуч занимает площадь более 1000 км² в северной части Центрально-Камчатской депрессии (рис. 1а). На основании взаимоотношений с ледниковыми образованиями второй стадии позднеплейстоценового оледенения возраст вулкана оценивается в 60–70 тыс. лет (Мелекесцев и др., 1991). Позднеплейстоценовый полигенный стратовулкан Старый Шивелуч и действующий в голоцене Молодой Шивелуч (рис. 1б) – главные структурные элементы массива (Мелекесцев и др., 1991). Северная часть Старого Шивелуча представляет собой конус с крутыми склонами, абсолютная высота которого 3283 м. Южный сектор вулканического массива разрушен в результате крупномасштабного обвала, имевшего место до начала второй стадии позднеплейстоценового оледенения (Мелекесцев и др., 1991). В северо-западной части обвального цирка расположен эруптивный центр Молодой Шивелуч, с которым в голоцене было связано не менее 60 крупных извержений, сопровождавшихся образованием мощных пирокластических потоков, обломочных лавин, пеплопадов и лахаров (Ponomareva et al., 2007). Серия побочных экструзивных куполов группы Каран (рис. 2, 3б), формировавшихся субсинхронно с Молодым Шивелучем, находится на западном склоне Старого Шивелуча.

Постройка вулкана Молодой Шивелуч занимает площадь 40 км² и состоит из экструзивных куполов, лавовых потоков и немногочисленных даек, разнообразных по морфологии, степени сохранности, со-

ставу и возрасту (рис. 3б). Северо-западный сектор постройки образован экструзией Четвертая вершина. Это высшая точка Молодого Шивелуча с абсолютной высотой 2763 м. Крутые западные склоны сформированы андезитовыми лавами двух сближенных экструзий, названных Горелым Мысом (Меняйлов, 1955). Восточные склоны сложены потоками лав различного состава и протяженности. Центральную часть постройки Молодого Шивелуча занимает активный кратер, сформированный в результате катастрофического извержения 12 ноября 1964 г., и вмещающий растущий экструзивный купол. Южное подножие вулкана покрыто голоценовыми пирокластическими отложениями, которые занимают площадь около 250 км².

Морфология и строение вулкана Молодой Шивелуч и экструзий группы Каран

Северо-восточный сектор вулкана Молодой Шивелуч сложен потоками лав $Ol-Px-Pl \pm Hbl$ андезитов и $Ol-Cpx-Pl$ андезибазальтов. Потоки берут начало на абсолютной высоте ~2000 м и образуют узкие субпараллельные ступени высотой до 25 м. Наиболее мощный и протяженный лавовый поток прослеживается вниз до высоты 1200 м. Обнажение лавового потока вскрыто в правом борту реки Сухой Ильчинец (рис. 4а). По строению поток зонален: в его кровле и подошве бурая лава брекчирована, а центральная часть характеризуется массивной субвертикальной отдельностью (рис. 4б), которая местами сменяется тонкоплитчатой отдельностью, ориентированной по течению потока. Мощность потока достигает 40–50 м, протяженность 4 км.

На северо-восточном склоне вулкана Молодой Шивелуч обнаружены экструзивные тела, ранее не описанные в литературе. Эти небольшие по объему экструзии, расположенные в краевой части лед-

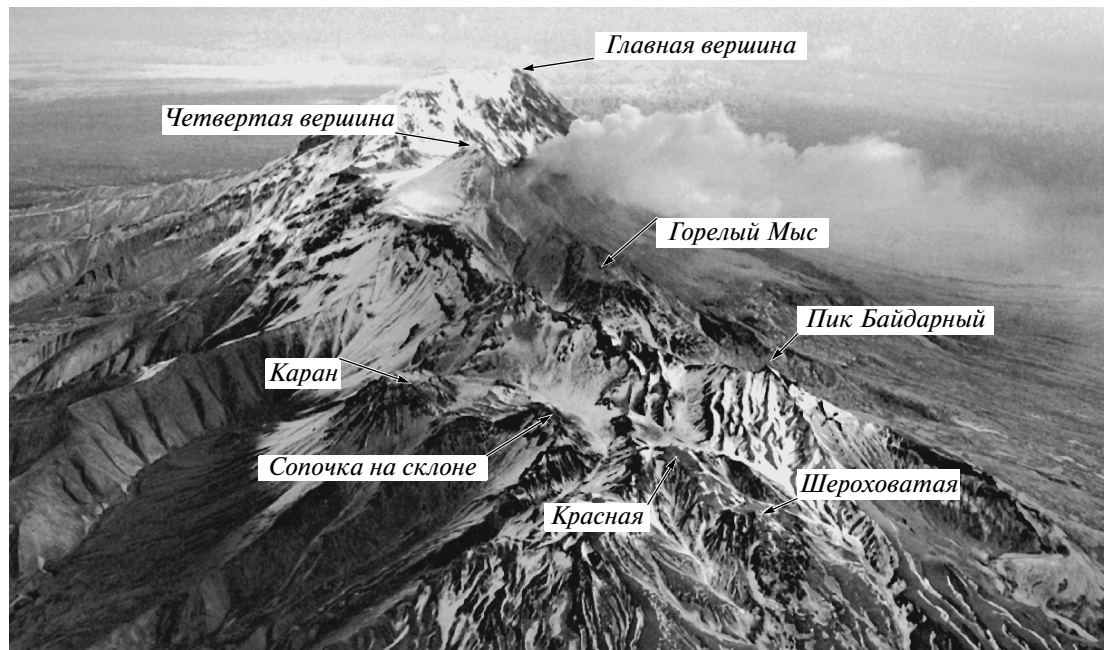


Рис. 2. Вид на вулкан Молодой Шивелуч с юго-запада.

Приведены основные географические названия, упоминающиеся в тексте. Фото А.В. Сокоренко.

никовой седловины, разделяющей массив Главной вершины вулкана Старый Шивелуч и постройку Молодого Шивелуча, названы нами Ледовая и Разрушенная (рис. 4в, 4г). Экструзия Ледовая (N 56.64232, E 161.33478, высота 2370 м) имеет уплощенную вершину и сглаженные склоны (рис. 4в), вытянута в северо-западном направлении и обнажена над современным ледником на высоту ~200 м. Лавы, слагающие экструзию, имеют шаровую отдельность. Размер шаров составляет 20–30 см. В центре шаров серая лава хорошо раскристаллизована, а его края имеют бурую окисленную оторочку шириной 2–3 см. Морфология экструзии и закалочная текстура ее лав позволяют отнести это образование к типу туюя, сформировавшуюся при подледном извержении.

Экструзия Разрушенная (N 56.64055, E 161.33778, высота 2150 м) расположена между ледником Ильчинец и его небольшим правым притоком (рис. 4г). Узкий ледопад, соединяющий приток с основным ледником, интенсивно разрушает юго-восточный склон экструзии. Северный склон экструзии более пологий, в его нижней части наблюдается небольшой поток глыбовой лавы. В 100 м ниже по склону находится дайка северо-западного простирания мощностью до 7 м, протяженностью 150 м.

Серия лавовых потоков юго-восточного сектора. Вдоль юго-восточной стенки современного кратера наблюдается ряд лавовых потоков меньшей мощности и протяженности. Истоки этих потоков срезаны дугообразным уступом раннего кратера, который расположен на расстоянии ~400 м субпараллельно

кромке современного кратера. Нижние потоки буроватых андезибазальтовых лав имеют протяженность 3–3.2 км при мощности 20–25 м и перекрываются более короткими потоками андезитовых и гетеротакситовых лав. Наиболее интересным является поток лав с гетеротакситовой текстурой (рис. 4д). В лавах наблюдаются полосы, линзы и заливы различного размера — от десятков см до микроскопических обособлений серого *Hbl-Pl* андезита в буром *Ol-Cpx-Pl* андезибазальте.

Западную и центральную части вулкана Молодой Шивелуч слагают экструзивные *Hbl-Pl* лавы. Наиболее крупная экструзия — Четвертая вершина с запада выглядит правильным конусом с крутыми до 40°–45° склонами, сглаженными мощным слоем пирокластики (рис. 2). Правильность склонов лишь в вершинной части нарушена отдельными лавовыми обелисками. Южнее Четвертой вершины расположены фрагменты двух сближенных экструзий Горелого Мыса. Подножие экструзий находится на высоте 1450 м, относительная высота составляет 650–700 м. Восточные склоны Четвертой вершины и Горелого Мыса срезает стенка современного кратера, образованного при извержении в 1964 г. Морфология кратера детально описана (Горшков, Дубик, 1969; Двигало, 1984). Наибольший поперечный размер (1750 м) кратер имеет в широтном направлении. Высота стенок у Четвертой вершины составляет 580 м и уменьшается до 360 м в северной части кратера. Юго-восточные стенки кратера до начала текущего извержения вулкана имели высоту 150–170 м и вскрывали потоки гетеротакситовых и анде-

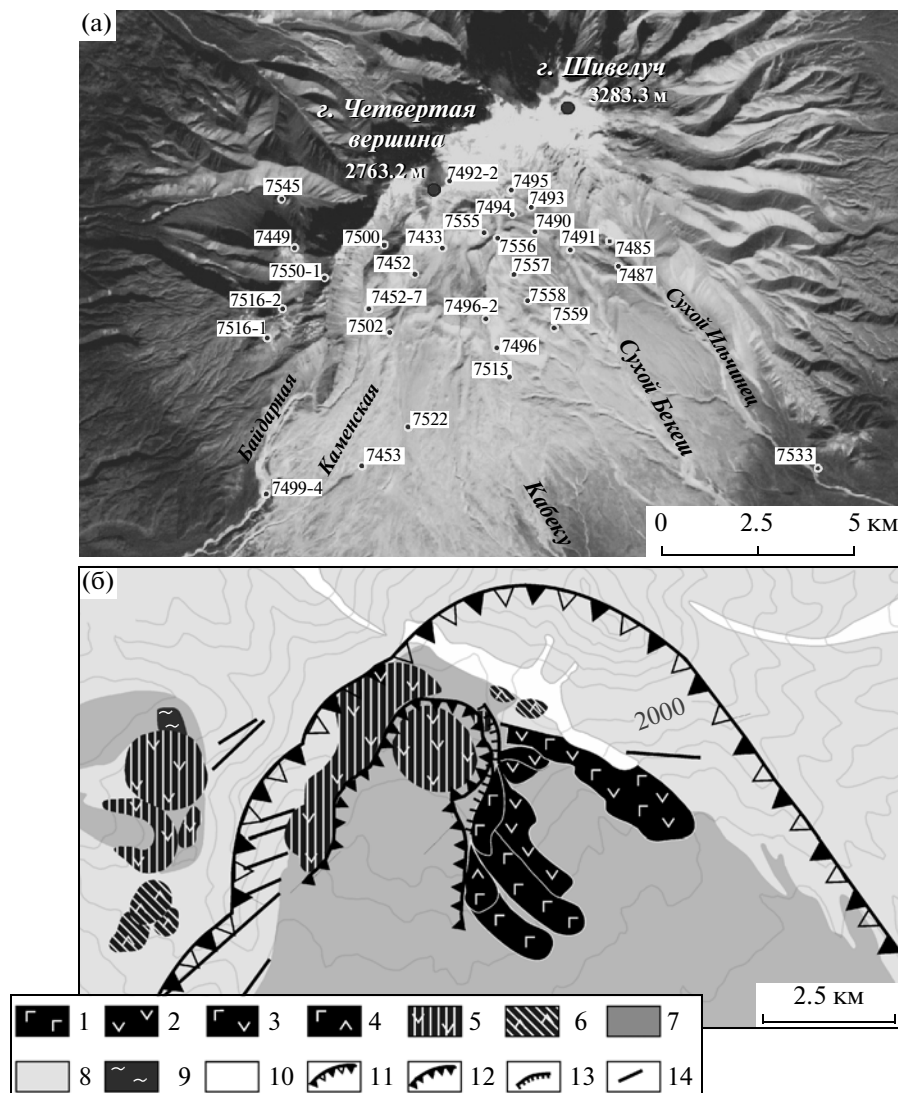


Рис. 3. Геологическое строение и позиция изученных образцов лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч.
 (а) – схема опробования лавовых образований Молодого Шивелуча; (б) – схема геологического строения лавового комплекса Молодого Шивелуча и экструзий группы Каран. **Потоки лав:** 1 – *Ol-Srx-Pl* андезибазальтов, 2 – *Hbl-Px-Pl* андезитов, 3 – *Ol-Px-Pl ± Hbl* андезибазальтов и андезитов, 4 – гетеротакситовых лав. **Экструзивные лавы:** 5 – *Hbl-Pl* и *Hbl-Px-Pl* андезитов, 6 – *Ol-Hbl ± Pl* и *Ol-Px-Pl ± Hbl* андезитов. **Прочие обозначения:** 7 – проксимальные пирокластические отложения и отложения обломочных лавин Молодого Шивелуча, 8 – лавовые и пирокластические образования постройки Старого Шивелуча, 9 – блок осадочных пород, 10 – современные ледники, 11 – бровка позднеплейстоценового обвального кратера, 12 – современный кратер, 13 – фрагменты ранних кратеров Молодого Шивелуча, 14 – дайки.

зибазальтовых лав. В ходе текущего извержения (с декабря 2006 г. по настоящее время) юго-восточный сектор кратера был заполнен грубообломочными отложениями раскаленных лавин.

К настоящему времени кратер заполнен лавами современного экструзивного купола и его обломочной мантией (Жаринов, Демянчук, 2008). Растущий купол (рис. 4д) представляет собой сложную многофазную экструзию. Внедрения вязкой андезитовой лавы на начальных стадиях роста в 1980–1981 гг. и в 1993–1995 гг. сформировали экструзивный купол со всеми характерными структурными и морфологиче-

скими особенностями (Двигало, 1984; Хубуная и др., 1995; Мелекесцев и др., 2004). Эксплозивно-экструзивные извержения 2001–2009 гг. динамично изменяли морфологию купола. В 2001–2002 гг. экструзия лав происходила в различных частях кратера (Федотов и др., 2001). В 2004 г. выжимание жестких блоков лавы в вершинной части купола сменилось изливанием потока глыбовой лавы на его юго-восточный склон (Горбач, 2006). В 2005 г. был сформирован крупный новый экструзивный блок в западной части кратера. Текущее извержение вулкана (с декабря 2006 г. по настоящее время) характеризуется высо-

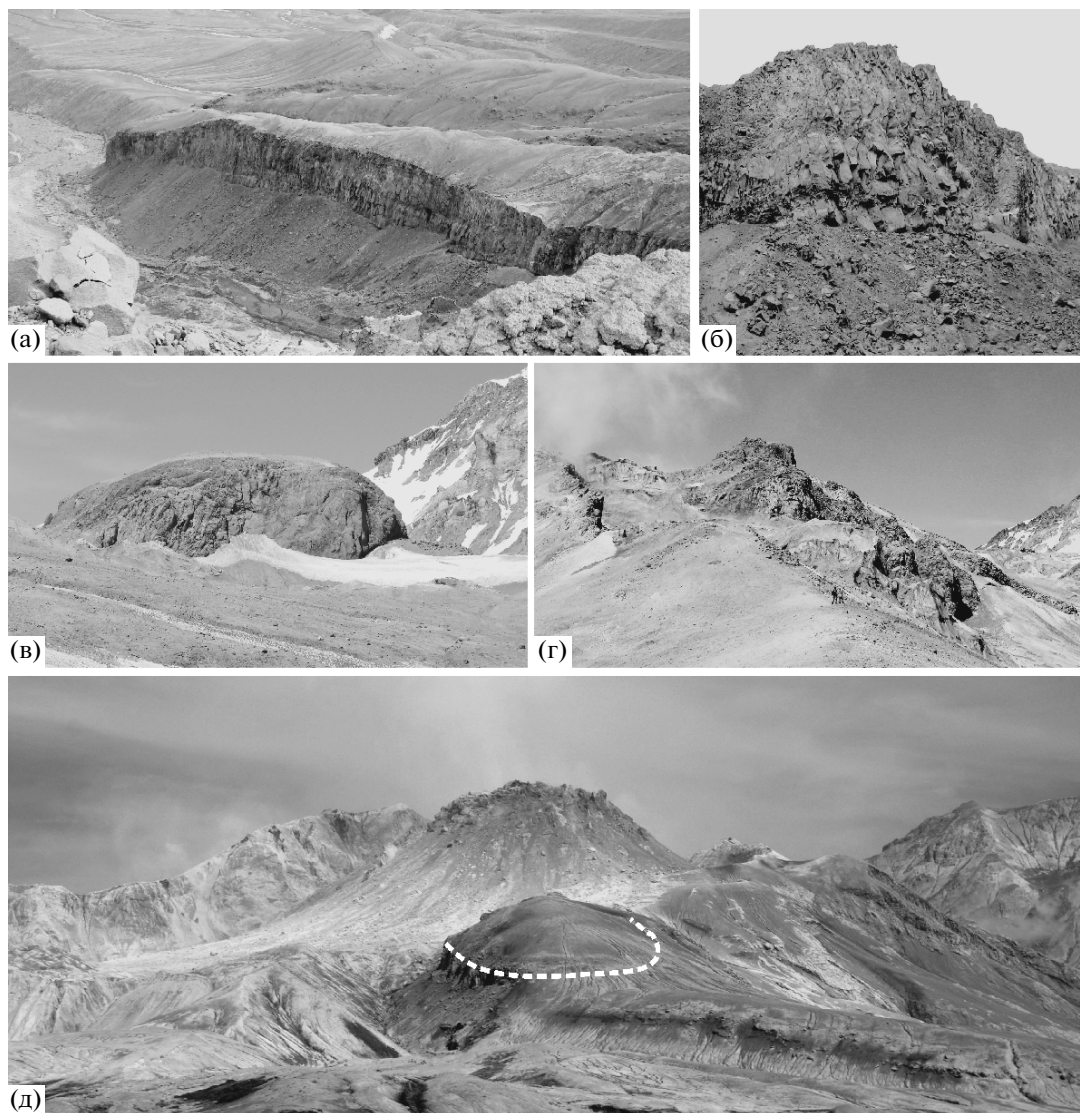


Рис. 4. Лавовые образования восточного сектора вулкана Молодой Шивелуч.

(а) — наиболее протяженный лавовый поток восточного склона; (б) — характер отдельности потока; (в) — экструзия Ледовая; (г) — экструзия Разрушенная; (д) — юго-восточный сектор Молодого Шивелуча, пунктиром выделен поток гетеротакситовых лав, над ним в центре — активный экструзивный купол.

кой скоростью поступления экструзивных лав в восточном и центральном секторах купола.

Экструзии группы Каран. Субсинхронно с формированием вулкана Молодой Шивелуч произошло выжимание экструзивных тел (экструзии гор Каран¹, Сопочка на склоне, Красная и Шероховатая) в ~5 км к западу от него (рис. 2). Согласно (Меняйлов, 1955), внедрение экструзий приурочено к разлому северо-восточного простираения, секущему

¹ В литературе и на топографических картах имеются расхождения относительно названий Каран и Сопочка на склоне. Мы относим название Каран к самой северной из экструзий с абс. выс. 1823.3 м, согласно топографической карте 1 : 50000.

западные склоны позднеплейстоценовой постройки Старого Шивелуча.

Экструзия г. Каран представляет собой сложно построенный купол с диаметром в основании 2 км, образованный в результате многократных внедрений *Hbl-Px-Pl* андезитов. У северного края купола экструзией вытасен блок осадочных пород предположительно неогенового возраста (Лопатин и др., 1979). С юга к г. Каран примыкает экструзивное тело меньших размеров (г. Сопочка на склоне), западный сектор которого разрушен и открыт в сторону долины р. Карина. По данным (Ponomareva et al., 2007), отложения пирокластических потоков и обломочных лавин связанные с деятельностью этих экстру-

зий, имеют возраст 1900 и 1450 ^{14}C лет соответственно. Между экструзиями расположена небольшая термальная площадка (Меняйлов, 1955) с многочисленными выходами маломощных низкотемпературных фумарол.

Экструзии гор Шероховатая и Красная находятся в 1 км к югу от г. Каран. Это два смежных купола с диаметрами в основании около 1.5 км и относительными превышениями 150–200 м. По морфологическим признакам экструзии являются более ранними образованиями относительно гор Каран и Сопочка на склоне. Лавы гор Шероховатой и Красной отличаются по составу от расположенных севернее экструзий и представлены *Ol-Hbl* ± *Pl* андезитами.

Возраст и последовательность формирования постройки вулкана Молодой Шивелуч

На основании полевых наблюдений мы предполагаем, что деятельность вулкана Молодой Шивелуч начиналась в районе ледниковой седловины с внедрения экструзий и излияния лав оливин-пироксен-плагиоклазовых амфиболсодержащих андезитов и андезибазальтов (экструзии Ледовая, Разрушенная и лавовые потоки, берущие начало в северо-восточном секторе постройки). Экструзивные тела Ледовая и Разрушенная имеют признаки взаимодействия с ледником, более мощным и обширным, чем современный, что может указывать на их формирование в конце позднеплейстоценового оледенения. В левом борту реки Сухой Ильчинец (т. 7533) были найдены отложения двух обломочных лавин, обломки которых близки по составу потокам лав и экструзиям северо-восточного сектора Молодого Шивелуча. Нижняя обломочная лавина красно-серых оттенков сложена крупными обломками *Hbl-Pl* андезитов и *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтов (обр. 7533-2, обр. 7533-2а, табл. 1, 2). В составе верхнего светло-серого обломочного горизонта присутствуют *Ol-Cpx-Pl* и *Ol-Px-Pl* ± *Hbl* породы (обр. 7482, 7533-4, 7533-5), по петрографическому и химическому составу сходные с лавами (обр. 7485-1, 7487, 7493, 7495) северо-восточного сектора Молодого Шивелуча. Под подошвой верхнего обломочного горизонта был отобран образец древесины, по которому получена радиоуглеродная дата 10240 ± 160 ^{14}C лет (обр. ГИН 14077). Петрографическое и петрохимическое сходство материала верхнего обломочного горизонта и наиболее ранних лавовых потоков и экструзий Молодого Шивелуча (табл. 1, 2) позволяет предположить, что начало эруптивной активности вулкана произошло ранее чем ~ 10000 ^{14}C лет, вероятно, в конце второй стадии позднеплейстоценового оледенения.

Истоки потоков юго-восточного сектора постройки Молодого Шивелуча, включая гетеротакситовые лавы, реконструируются в пределах современного кратера, что свидетельствует о смещении центра излияний к юго-западу. Возможно, возраст-

ную позицию этих гетерогенных по составу потоков можно привязать к извержению 3700 ^{14}C лет, которое предшествовало извержению *Ol-Cpx-Hbl* ± *Pl* базальтов 3600 ^{14}C лет. Из всего массива данных, опубликованных в работе (Ponomareva et al., 2007), тефра только этого извержения имеет разнородный состав обломков (обр. 00K20A1.00K20A2, 00K20B, 00K22, 00K23), идентичный контрастному составу лав юго-восточного сектора.

Экструзивные тела в западном секторе постройки Молодого Шивелуча формировались позднее. По данным (Мелекесцев и др., 2003), наиболее крупная экструзия Четвертая вершина была сформирована после ~ 1030 г., а извержение в ~ 1430 г. разрушило ее юго-восточный сектор.

Объем лавовых образований вулкана Молодой Шивелуч

Наблюдаемый максимальный объем лавовых образований Молодого Шивелуча не превышает 25 км³. Объем лав экструзий группы Каран составляет ~ 3 км³. Для вулкана, характерной чертой эруптивной деятельности которого является разрушение экструзивных куполов и образование обломочных лавин, эти оценки соответствуют только объему геологических тел, сохранившихся к настоящему времени, и не отражают реальную величину лав, изверженных вулканом. К примеру, обломочная лавина катастрофического извержения в 1964 г. разрушила 5 экструзивных куполов в центральном секторе Молодого Шивелуча (Горшков, Дубик, 1969). Объем удаленной части постройки, согласно (Мелекесцев и др., 2003), оценивается в 1.5–1.8 км³. В голоценовой истории зафиксировано не менее 14 обломочных лавин, связанных с деятельностью Молодого Шивелуча и экструзий группы Каран (Ponomareva et al., 1998). С учетом отложений обломочных лавин объем лавовых образований Молодого Шивелуча может быть близок к ~ 50 км³, что соответствует 1/3 от суммарного объема продуктов, изверженных вулканом в голоцене, рассчитанного исходя из продуктивности вулкана 36 млн. т/год (Мелекесцев и др., 1991).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования включали геохимическое опробование всех экструзивных тел, лавовых потоков и немногочисленных даек, слагающих постройку Молодого Шивелуча, а также экструзий группы Каран на западном склоне Старого Шивелуча. Схема опробования приведена на рис. 3а. Координаты и описание образцов, выбранных для детального изучения, приведены в табл. 1.

Для анализа химического состава было выбрано 38 представительных образцов, характеризующих все разнообразие лав Молодого Шивелуча. Определение главных элементов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и P) и некоторых элементов-примесей (V, Sr,

Таблица 1. Изученные образцы лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч

№ л/п	Номер образца	Географические координаты	Место отбора	Материал отбора	Петрографический тип
1	7433	N56.63219 E161.31098	Современный экструзивный купол	Экструзивные лавы, извержение 2004 г.	Hbl-/Pl андезит
2	7449	N56.63230 E161.24328	Экструзия Каран	Экструзивные лавы	Px-Hbl-/Pl андезит
3	7452-1	N56.63199 E161.30454	Современный экструзивный купол	Экструзивные лавы, извержение 2005 г.	Hbl-/Pl андезит
4	7452-7	N56.61212 E161.26836	Современный экструзивный купол	Материал горячей лавины, извержение 2005 г.	Hbl-/Pl андезит
5	7453	N56.56935 E161.24670	Верховья р. Каменской	Пемзы пирокластического потока, извержение 1964 г.	Hbl-/Pl андезит
6	7482	N56.56866 E161.47090	Среднее течение р. Сухой Ильичинец	Материал обломочной лавины	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
7	7485	N56.63187 E161.38018	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Дайка	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
8	7485-1	N56.63187 E161.38018	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавобрекия	Hbl-/Pl андезит
9	7487	N56.62871 E161.37773	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx±Hbl андезит
10	7491	N56.62391 E161.36591	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx±Hbl андезит
11	7492-2	N56.64336 E161.31654	Экструзия Четвертая вершина	Экструзивные лавы	Hbl-/Pl андезит
12	7493	N56.63765 E161.34209	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Дайка	Ol-Cpx±Hbl андезибазальт
13	7494	N56.63881 E161.32789	СВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Экструзивные лавы	Px-Hbl андезит
14	7495	N56.64232 E161.33478	Экструзия Ледовая	Экструзивные лавы	Ol-Cpx±Hbl андезибазальт
15	7496	N56.60498 E161.33498	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
16	7496a	N56.61130 E161.32859	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
17	7496-1	N56.60498 E161.33498	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
18	7496-2	N56.61130 E161.32859	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Hbl-/Pl андезит
19	7496-3	N56.60921 E161.32294	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Hbl-/Pl андезит
20	7499-4	N56.56429 E161.20049	Среднее течение р. Байдарной	Меланократовое включение в глыбе пирокластического потока извержения 27 февраля 2005 г.	Ol-Px±Hbl-/Pl андезибазальт
21	7500	N56.62518 E161.26911	Экструзия Горелого Мыса	Экструзивные лавы	Hbl-/Pl андезит
22	7502	N56.61228 E161.27193	Экструзия Горелого Мыса	Экструзивные лавы	Hbl-/Pl андезит
23	7515	N56.59372 E161.32424	Истоки р. Кабеку	Крупнообломочный материал пирокластического потока, извержение 2007 г.	Hbl-/Pl андезит
24	7515-1	N56.59372 E161.32424	Истоки р. Кабеку	Крупнообломочный материал пирокластического потока, извержение 2007 г.	Hbl-/Pl андезит
25	7516-1	N56.60860 E161.22872	Экструзия Красная	Экструзивные лавы	Ol-Hbl андезит
26	7516-2	N56.60860 E161.22872	Экструзия Шероховатая	Экструзивные лавы	Ol-Hbl андезит
27	7522	N56.58615 E161.29006	Истоки р. Кабеку	Крупнообломочный материал пирокластического потока, извержение 2007 г.	Hbl-/Pl андезит
28	7533-2	N56.56935 E161.46807	Среднее течение р. Сухой Ильичинец	Материал обломочной лавины	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
29	7533-2a	N56.56935 E161.46807	Среднее течение р. Сухой Ильичинец	Материал обломочной лавины	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
30	7533-4	N56.56935 E161.46807	Среднее течение р. Сухой Ильичинец	Материал обломочной лавины	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
31	7533-5	N56.56935 E161.46807	Среднее течение р. Сухой Ильичинец	Материал обломочной лавины	Ol-Cpx±Hbl андезит
32	7550-1	N56.61349 E161.25161	Западный гребень кальдеры	Останец	Ol-Cpx-Hbl±Pl базальт
33	7555	N56.63084 E161.32245	Современный экструзивный купол	Экструзивные лавы, извержение 2008 г.	Hbl-/Pl андезит
34	7556	N56.62713 E161.32639	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Ol-Cpx-Pl андезибазальт
35	7558	N56.61766 E161.34132	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Hbl-/Pl андезит
36	7559	N56.60772 E161.35253	ЮВ сектор постройки Молодого Шивелуча	Лавовый поток	Px-Hbl-/Pl андезит
37	3000-1	—	Среднее течение р. Байдарной	Пемзы пирокластического потока, извержение 2001 г.	Hbl-/Pl андезит
38	K1-18B	N56.52300 E161.40600	Среднее течение р. Кабеку	Тефра извержения 3600 ¹⁴ С лет	Ol-Cpx Hbl±Pl базальт

Примечание. Образец 3000-1 любезно предоставлен С.А. Хубуная (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН). Географические координаты приведены в десятичных градусах.

Таблица 2. Химический состав пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	7433	7449	7452-1	7452-7	7453	7482	7485	7485-1	7487	7491	7492-2	7493	7494	7495	7496	7496a	7496-1	7496-2	7496-3
SiO ₂	62.74	56.96	62.65	61.19	61.09	56.72	56.42	59.77	57.78	58.78	61.05	56.67	61.7	56.13	56.38	56.09	56.43	61	57.91
TiO ₂	0.52	0.78	0.51	0.52	0.54	0.74	0.72	0.58	0.67	0.62	0.58	0.66	0.6	0.8	0.77	0.79	0.76	0.59	0.73
Al ₂ O ₃	16.57	15.56	16.65	16.24	16.89	15.73	16.06	16.25	15.69	15.79	16.83	15.63	16.48	15.38	15.95	16.02	16	16.1	16.01
FeO	4.44	6.75	4.45	4.79	4.99	7.30	7.06	5.73	6.68	6.16	5.27	6.52	5.40	7.05	7.25	7.46	7.14	5.33	6.79
MnO	0.09	0.13	0.09	0.1	0.1	0.14	0.13	0.12	0.13	0.12	0.1	0.13	0.11	0.14	0.14	0.15	0.14	0.11	0.14
MgO	3.45	6.04	3.49	3.67	3.7	6.04	6.48	4.44	6.79	5.72	4.08	6.32	4.17	6.92	5.82	5.87	5.53	4.29	5.49
CaO	5.51	7.34	5.64	5.76	6	8	8.02	6.35	7.34	6.75	5.95	7.23	6.02	8	8.05	8.16	7.99	5.91	7.5
Na ₂ O	4.88	3.77	4.84	4.57	4.6	3.65	4.03	4.28	4.04	4.07	4.71	4.02	4.59	4.02	3.76	3.77	3.77	4.51	3.88
K ₂ O	1.2	1.52	1.24	1.42	1.27	1.31	1.08	1.36	1.16	1.25	1.2	1.18	1.33	0.73	1.27	1.2	1.28	1.38	1.29
P ₂ O ₅	0.15	0.2	0.16	0.18	0.17	0.22	0.19	0.18	0.19	0.18	0.06	0.2	0.15	0.23	0.22	0.25	0.22	0.18	0.21
H ₂ O	0.29	0.35	0.23	1.48	0.79	0.14	0.17	0.83	0.12	0.31	0.52	0.19	0.14	0.30	0.24	0.47	0.33	0.48	0.27
CO ₂	0.04	0.01	0.01	0.05	0.05	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.06	0.02	0.09	0.04	0.05	0.03
Сумма	99.88	99.41	99.96	99.97	100.19	100.01	100.37	99.92	100.61	99.78	100.38	98.77	100.70	99.76	99.87	100.32	99.63	99.93	100.25
Co	15	31	19	20	22	24	26	21	27	27	21	24	21	35	30	27	27	21	26
Cr	110	238	118	130	123	212	198	123	307	248	152	283	137	284	194	187	187	157	186
Ni	18	60	16	18	16	28	57	18	78	59	30	63	28	54	38	36	34	39	31
V	114	198	110	120	118	208	206	147	176	163	120	167	133	200	206	201	196	130	187
Zn	56	69	52	57	62	68	72	64	68	67	62	65	65	82	74	72	69	64	70
Ga	18	16	18	19	17	18	17	18	18	18	20	19	16	17	15	17	18	18	18
Rb	24	28	24	28	24	25	19	28	23	25	20	25	27	14	28	25	27	29	26
Ba	387	608	390	440	406	351	288	411	340	364	405	331	396	287	395	374	422	423	392
Sr	569	1008	579	534	565	487	453	496	470	489	576	482	524	654	521	520	525	525	515
Y	8	18	10	12	15	19	17	14	14	12	12	14	12	25	17	18	19	12	18
Zr	92	92	93	109	100	97	84	110	86	94	95	89	102	64	91	90	94	104	91
Mg#	58.1	61.5	58.3	57.7	56.9	59.6	62.0	58.0	64.4	62.3	58.0	63.3	57.9	63.6	58.8	58.4	58.0	58.9	59.0
Sr/Y	71.1	56.0	57.9	44.5	37.7	25.6	26.6	35.4	33.6	40.8	48.0	34.4	43.7	26.2	30.6	28.9	27.6	43.8	28.6

Таблица 2. Окончание

Компо- ненты	7499-4	7500	7502	7515	7515-1	7516-1	7516-2	7522	7533-2	7533-2a	7533-4	7533-5	7550-1	7555	7556	7558	7559	3000-1	К1-18В
SiO ₂	56.3	58.99	60.82	63.48	61.26	60.21	59.88	60.77	59.11	55.98	55.99	57.3	51.08	60.55	55.01	59.09	58.11	61.35	50.55
TiO ₂	0.59	0.63	0.58	0.48	0.55	0.6	0.61	0.57	0.69	0.73	0.73	0.73	0.81	0.52	0.68	0.6	0.67	0.54	0.84
Al ₂ O ₃	15.46	16.22	16.5	16.49	16.61	15.66	15.71	16.44	16.33	15.5	15.34	15.87	12.77	16.43	15.37	16.39	15.95	16.48	13.49
FeO	6.30	5.88	5.15	4.28	4.94	5.61	5.69	5.13	6.32	7.41	7.27	6.84	8.31	4.58	6.84	5.34	6.00	4.59	8.13
MnO	0.11	0.12	0.1	0.09	0.1	0.12	0.12	0.11	0.13	0.15	0.15	0.14	0.16	0.1	0.12	0.11	0.13	0.09	0.16
MgO	7.82	4.65	4.22	3.32	3.99	5.38	5.54	4.15	4.52	6.39	6.55	5.55	11.82	3.65	7.62	4.1	4.2	3.58	10.33
CaO	7.49	6.62	6.22	5.38	6.12	6.34	6.46	6.2	6.75	8.17	8.25	7.49	8.39	5.84	7.57	6.27	6.44	5.76	8.64
Na ₂ O	3.74	4.42	4.5	4.9	4.72	4.2	4.13	4.7	4.16	3.49	3.54	3.9	2.58	4.58	3.64	4.51	4.01	4.77	2.53
K ₂ O	0.97	1.36	1.34	1.25	1.25	1.4	1.34	1.3	1.44	1.21	1.21	1.26	1.9	1.22	0.96	1.32	1.49	1.24	1.93
P ₂ O ₅	0.13	0.19	0.17	0.15	0.17	0.18	0.17	0.17	0.19	0.21	0.2	0.19	0.36	0.17	0.18	0.2	0.21	0.16	0.41
H ₂ O	0.46	0.54	0.32	0.16	0.26	0.26	0.21	0.37	0.24	0.56	0.4	0.3	0.24	0.23	0.50	0.41	0.65	0.79	0.86
CO ₂	0.05	0.07	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.15
Сумма	99.42	99.69	99.94	99.98	99.98	99.98	99.89	99.96	99.92	99.82	99.64	99.59	98.45	97.88	98.49	98.35	97.21	99.37	98.02
Co	35	20	18	15	21	24	28	19	23	31	31	28	42	22	35	21	25	20	37
Cr	474	155	154	114	127	265	266	146	119	241	237	167	772	109	347	115	94	108	669
Ni	110	33	27	14	22	46	48	26	21	36	30	33	212	14	110	14	16	18	148
V	178	148	133	106	127	144	146	129	175	209	187	188	226	116	185	139	171	119	229
Zn	60	62	62	54	59	59	62	66	68	70	70	69	71	51	66	59	70	60	64
Ga	17	15	19	17	18	15	17	20	17	14	16	18	16	18	17	22	20	18	13
Rb	18	28	24	26	26	28	28	25	26	23	23	24	45	24	20	28	34	24	44
Ba	296	358	432	399	385	494	434	430	432	319	308	389	475	388	266	387	388	378	405
Sr	451	537	551	567	573	488	483	551	519	470	468	513	471	576	460	605	511	557	485
Y	12	17	13	12	12	12	11	13	18	19	18	20	22	15	17	16	19	12	21
Zr	68	104	96	93	99	97	96	97	113	92	91	103	84	100	87	100	117	97	93
Mg#	68.9	58.5	59.4	58.0	59.0	63.1	63.5	59.0	56.0	60.6	61.6	59.1	71.7	58.7	66.5	57.8	55.5	58.2	69.4
Sr/Y	37.6	31.6	42.4	47.3	47.8	40.7	43.9	42.4	28.8	24.7	26.0	25.7	21.2	39.2	26.7	37.4	27.1	46.4	23.1

Примечание. Номера и геологическая позиция образцов соответствуют таковым в табл. 1.

Co, Ni, Ga, Sr, Rb, Ba, Zr, Nb, Y и Zn) в породах выполнено рентгенофлюоресцентным методом (спектрометр Phillips X'Unique PW1480) в Институте морских исследований им. Ляйбница (ИФМ-ГЕОМАР, г. Киль, ФРГ). Вместе с образцами анализировались международные стандарты пород JB-2, JB-3 и JA-2.

Состав породообразующих минералов изучен в мономинеральных прозрачно-полированных препаратах на электронном зонде JEOL JXA-8200 (ИФМ-ГЕОМАР г. Киль, ФРГ), оборудованном пятью спектрометрами с дисперсией по длинам волн. Анализ проводили фокусированным пучком при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 100 нА для оливина и 20 нА для плагиоклаза, амфибола, пироксена и шпинели. Для стандартизации и контроля качества анализов использовали природные минералы, международные стандарты для электронно-зондового микроанализа (Jarosevich et al., 1980).

Вариации состава минералов и интерстициальных стекол в различных по составу участках гетеротакситовых лав и на границе меланократовое включение—вмещающая порода, были изучены в аншлифах по профилям вкрест контакта с использованием рентгеноспектрального микроанализатора “Camebax” с энергодисперсионным детектором “Kevex” (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, аналитик Т.М. Философова). Рабочие условия анализа составляли: напряжение 20 кВ и ток 40 нА. В качестве стандартов использовались природные силикаты: санидин для Si, Na, Al, K; диопсид для Ca и Mg; оливин для Fe; ильменит для Ti и родонит для Mn.

ПЕТРОГРАФИЯ ЛАВ ВУЛКАНА МОЛОДОЙ ШИВЕЛУЧ

Оливин-пироксен-плагиоклазовые амфиболсодержащие андезиты и андезибазальты слагают лавовые потоки, экструзии и дайки северо-восточного сектора вулкана Молодой Шивелуч. Макроскопически это серые, темно-серые, иногда буроватые, массивные породы с порфировой и серийно-порфировой структурой. Вкрапленники (30–35%) представлены плагиоклазом (15–20%), пироксеном (7–8%), оливином (до 7%) и роговой обманкой (2–5%), часто полностью опациitized. Основная масса состоит из микролитов плагиоклаза 0.02–0.1 мм, мелкозернистых агрегатов пироксена, редко оливина, погруженных в раскристаллизованное стекло. Снизу вверх по разрезу лав количество и сохранность вкрапленников роговой обманки увеличивается, а количество фенокристаллов оливина уменьшается.

Потоки лав юго-восточного сектора конуса Молодой Шивелуча неоднородны по составу. Нижние потоки сложены **оливин-клинопироксен-плагиоклазовыми андезибазальтами**. От описанных выше пород северо-восточного сектора их отличает большее количество вкрапленников и гломеропорфириковых сростков клинопироксена и оливина и меньшее ко-

личество роговой обманки, часто полностью диссоциированной. Андезибазальты перекрываются потоком **гетеротакситовых лав**, представляющих собой крупные полосы, заливы и мельчайшие обособления серого *Hbl-Pl* андезита в буром *Ol-Cpx-Pl* андезибазальте. Различия в составе лав прекрасно видны как визуально, так и микроскопически. Лавы отличаются составом минеральных фаз и характером структуры основной массы. В порфириковых выделениях андезибазальтовой лавы присутствуют клинопироксен (8–10%), оливин (до 5%), их сростки и плагиоклаз (~5%). Обособления и заливы серого андезита содержат фенокристаллы плагиоклаза (25–30%), часто резорбированные или с ситовидной структурой в краевых частях, и роговую обманку (7–10%), крупные кристаллы которой интенсивно опациitized, а более мелкие — полностью замещены рудным минералом.

Экструзивные лавы Четвертой вершины, Горелого Мыса и современного купола представлены **роговообманково-плагиоклазовыми андезитами, реже андезидацитами**. Это серые, розовато-серые, бурые породы различной плотности — от сильнопористых пемзовидных лав до массивных разностей. Структура лав порфировая или серийно-порфировая, структура основной массы гиалопилитовая, микролитовая. Текстура иногда полосчатая. Вкрапленники (от 20 до 50%) представлены плагиоклазом (12–30%), бурой роговой обманкой (7–25%), пироксенами (2–5%). Пироксены в основном присутствуют в микровкрапленниках размером 0.2–0.4 мм, в незначительном количестве наблюдаются короткопризматические фенокристаллы ортопироксена размером до 1 мм. В некоторых разностях отмечается оливин в виде редких округлых зерен, окруженных реакционной каймой из мелкозернистых агрегатов ортопироксена и амфибола. В лавах, изверженных в 2004 г., встречены единичные опациitized чешуйки биотита. Основная масса состоит из кислого стекла, микролитов плагиоклаза, иголок апатита, незначительного количества роговой обманки и рудного минерала.

Западные побочные экструзии сложены **пироксен-роговообманково-плагиоклазовыми андезитами** (экструзии гор Каран и Сопочка на склоне) и **оливин-роговообманковыми плагиоклазсодержащими андезитами** (экструзии гор Шероховатая и Красная). *Ol-Hbl ± Pl* андезиты отличаются рядом специфических особенностей. Облик этих пород определяется резким преобладанием во вкрапленниках паргаситовой роговой обманки (от 0.2–0.3 мм до 2–3 мм) и присутствием оливина как в ядрах фенокристаллов роговой обманки и в оторочке из ее зернистых агрегатов, так и в виде немногочисленных индивидуальных вкрапленников и их сростков. В породах также отмечены широкотаблитчатые мегавкрапленники плагиоклаза — андезина размером до 7–10 мм и присутствие кристобалита в основной массе.

Оливин-клинопироксен-роговообманковые флогопитсодержащие базальты. Породы такого необычного состава были описаны в тефре извержения 3600 ¹⁴C лет (Вольнец и др., 1997). Небольшой коренной выход аналогичных пород был найден на западном гребне кальдеры севернее пика Байдарный. Предположительно, этот коренной выход представляет собой останец или же апофиз крупного тела, существовавшего в западном секторе вулкана Молодой Шивелуч.

Ol-Cpx-Hbl ± Phl базальты представляют собой светло-серые массивные хорошо раскристаллизованные породы с крупными до 3–5 мм вкрапленниками форстерита (10–15 об. %) и обильными выделениями мелкого игольчатого амфибола (15–20 об. %). В небольшом количестве присутствуют вкрапленники клинопироксена. Флогопит отмечен в виде единичных опациitized субфенокристаллов. Основная масса породы состоит из буроватого стекла с многочисленными микролитами плагиоклаза, пироксенов и рудного минерала. Состав интерстициального стекла варьирует от латита до калиевого риодацита (Вольнец и др., 1997).

Меланократовые включения. В блоках *Hbl-Pl* андезитов в отложениях пирокластического потока 2005 г. были найдены кристаллические включения с закаленной текстурой, по составу отвечающие андезибазальту. Включения содержат крупные слегка корродированные фенокристаллы магнезиального оливина с обильными выделениями хромистой шпинели. Вокруг оливина иногда формируется кайма амфибола и/или пироксенов. Основная масса состоит из игольчатых кристаллов плагиоклаза и амфибола и чистого прозрачного стекла с большим количеством крупных изометричных пор. Контакты с вмещающей лавой отчетливые, иногда с заливами основной массы.

СОСТАВ ПОРОДОБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Плагиоклаз

Плагиоклаз преобладает среди вкрапленников всех изученных разновидностей пород вулкана Молодой Шивелуч, за исключением оливин-роговообманковых плагиоклазсодержащих андезитов и оливин-клинопироксен-роговообманковых флогопитсодержащих базальтов. Состав ядер вкрапленников варьирует от *An*₃₂ до *An*₈₈. Сложная зональность, разнообразие текстур и значительные вариации составов ядер вкрапленников характерны для плагиокла-

зов андезитовых и андезибазальтовых лав. Резорбированные и проплавленные ядра, промежуточные и внешние зоны, резкая прямая, обратная и осцилярная зональность типичны для плагиоклазов Молодого Шивелуча. Скачкообразные изменения состава, которые часто маркируются зонами резорбции и обилием включений расплава, характерны как для границы ядро–внешние зоны (рис. 5а), так и для промежуточных зон. Типичными являются плагиоклазы с пятнистым ядром, содержащим ~80 мол. % *An* (рис. 5б), с тонкой ритмичной зональностью (рис. 5в), с кислым оплавленным ядром (рис. 5г), с обратной зональностью. Все перечисленные типы зональности вкрапленников могут сочетаться в одном образце. Особенно ярко это проявлено в андезитах современного экструзивного купола и в потоках лав северо-восточного сектора Молодого Шивелуча (табл. 3).

Статистические вариации состава центральных и промежуточных зон вкрапленников плагиоклаза указывают на примесь андезитового материала в андезибазальте и андезибазальтового в андезите (рис. 6а, 6б). Бимодальное распределение состава характерно для плагиоклазов как андезитовых, так и андезибазальтовых лав. В андезитах резко преобладают вкрапленники лабрадора *An*_{48–56}, но выделяется пиковый интервал, отвечающий *An*_{68–72}. В андезибазальтах при преобладании лабрадора-битовнита *An*_{68–76} присутствует и значимое количество *An*_{48–56}.

Особенно информативными о процессах смешения магм при образовании серии пород вулкана Молодой Шивелуч являются вариации микроэлементов в плагиоклазах. Как показано на рис. 7, кальциевые плагиоклазы *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтов имеют содержание FeO, которое в два и более раза превышает его концентрацию во вкрапленниках *Hbl-Pl* андезитов. Точки составов плагиоклазов из *Ol-Px-Pl ± Hbl* породы (обр. 7487), которая петрографически уверенно определяется как гибридная промежуточная разность, образуют две четкие группы, отвечающие полям андезибазальтовых и андезитовых лав.

Амфибол

Амфибол. Фенокристаллы амфибола присутствуют во всех разновидностях пород вулкана Молодой Шивелуч — от единичных реликтовых зерен в *Ol-Cpx-Pl* андезибазальтах до 7–25 об. % в более кислых породах. В *Hbl-Pl* андезитах бурая роговая обманка образует призматические фенокристаллы (до 2–3 мм),

Рис. 5. Характер зональности фенокристаллов плагиоклаза в лавах современного экструзивного купола (обр. 7515-1).

(а) — плагиоклаз с обратной зональностью, ядро и его кальциевая кайма разделены широкой зоной резорбции с обилием включений расплава; (б) — плагиоклаз с пятнистым деанортитизированным ядром; (в) — плагиоклаз с тонкой осцилярной зональностью и реликтом кальциевого ядра; (г) — плагиоклаз с оплавленным кислым ядром. Черная линия с ромбами показывает вариации содержаний анортитовой составляющей, серая линия отвечает вариациям концентраций FeO по профилю кристалла. Линия профиля обозначена (на фото) черным пунктиром со стрелкой.

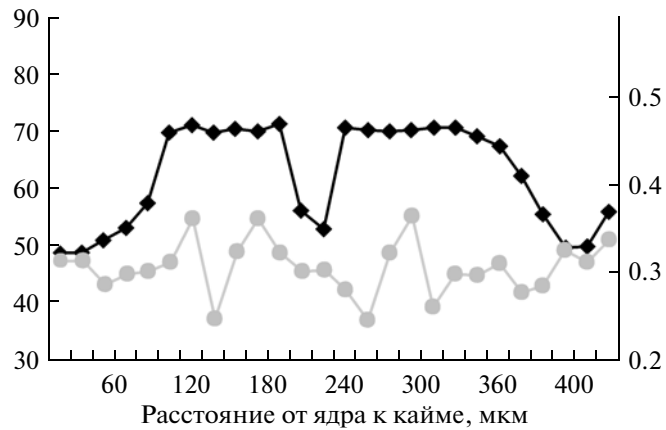
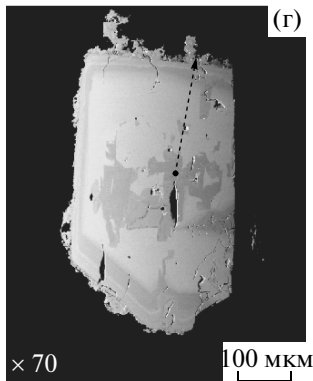
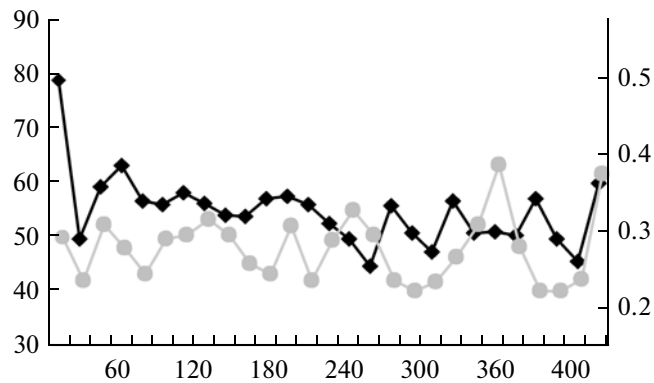
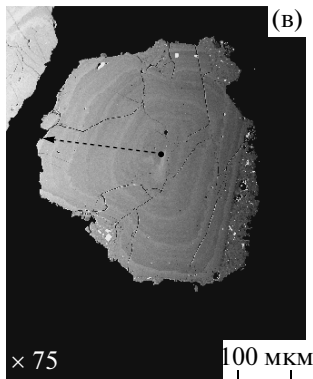
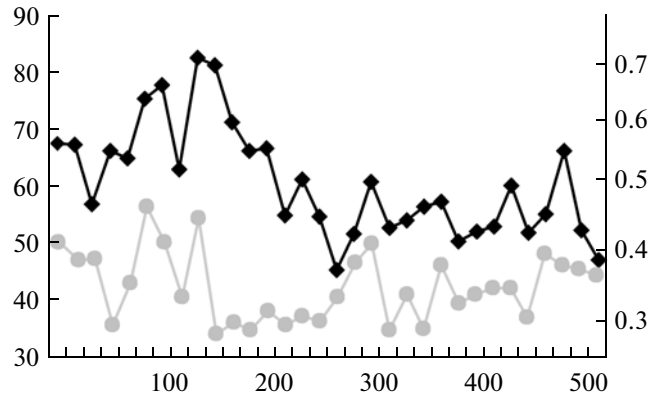
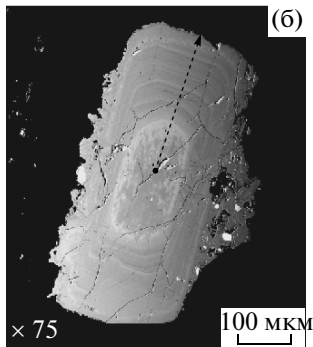
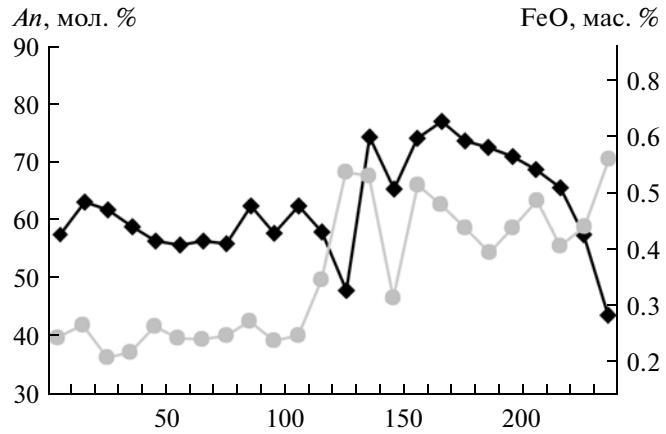
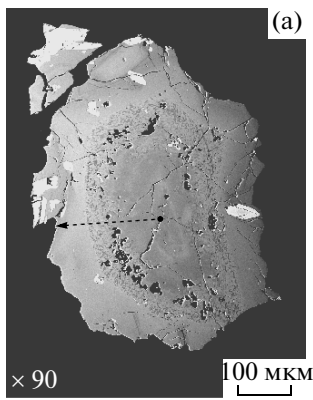


Таблица 3. Представительные составы плагиоклазов (мас. %) пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	Обр. 7496а												
	Я	З	З	З	К	Я	К	Я	З	К	М	М	М
SiO ₂	58.30	51.19	59.35	55.49	56.87	51.65	58.19	58.03	52.87	58.14	53.92	55.97	50.85
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.00	0.03	0.05	0.07	0.00
Al ₂ O ₃	25.19	29.59	24.21	26.48	26.86	29.25	24.97	25.37	28.99	25.67	29.25	27.69	30.36
FeO	0.37	0.31	0.38	0.46	0.50	0.53	0.69	0.33	0.39	0.41	1.06	1.02	1.05
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01
CaO	7.60	13.33	7.00	9.76	10.03	13.22	8.20	8.96	12.41	8.35	12.80	10.32	14.36
Na ₂ O	6.70	3.95	7.01	5.66	4.25	3.59	5.96	5.99	3.96	5.56	3.84	5.45	3.40
K ₂ O	0.33	0.17	0.40	0.32	0.33	0.14	0.45	0.36	0.20	0.33	0.33	0.48	0.11
Сумма	98.51	98.55	98.37	98.21	98.85	98.37	98.54	99.08	98.82	98.49	101.28	101.00	100.13
An, мол. %	48.76	73.90	45.59	59.14	66.45	75.55	53.56	55.66	72.42	55.75	73.64	61.36	78.01
	Обр. 7487												
	Я	З	К	Я	К	Я	З	З	З	К	М	М	М
SiO ₂	60.45	59.07	52.04	52.44	58.76	57.82	54.05	58.98	51.22	58.73	50.87	52.66	50.04
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	23.49	24.46	28.84	28.75	24.69	25.99	28.21	24.39	30.14	24.86	29.80	28.40	28.72
FeO	0.44	0.36	0.95	0.46	0.46	0.44	0.38	0.41	0.35	0.41	0.94	1.08	1.25
MgO	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00
CaO	6.87	7.50	13.43	13.13	8.02	8.81	11.41	7.37	13.46	7.38	13.41	12.18	13.44
Na ₂ O	7.13	6.88	3.16	4.15	7.09	6.08	4.70	6.60	3.37	6.95	3.74	4.68	3.68
K ₂ O	0.54	0.50	0.22	0.17	0.56	0.25	0.19	0.67	0.13	0.36	0.21	0.26	0.21
Сумма	98.94	98.77	98.65	99.11	99.60	99.41	98.96	98.42	98.68	98.69	98.99	99.31	97.34
An, мол. %	44.70	47.77	78.09	72.64	48.71	54.88	67.07	48.39	77.03	47.11	75.08	68.62	75.43
	Обр. 7433						Обр. 7515						
	Я	К	Я	З	К	Я	З	К	Я	З	З	З	К
SiO ₂	49.79	55.94	50.88	57.80	57.25	56.96	52.54	57.64	59.95	53.32	58.45	53.65	59.57
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.06	0.08	0.06	0.09
Al ₂ O ₃	33.44	27.63	30.56	25.83	26.83	25.90	30.14	26.68	26.45	30.73	27.39	30.97	26.85
FeO	0.59	0.56	0.28	0.33	0.45	0.37	0.24	0.31	0.32	0.31	0.31	0.30	0.32
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	16.77	9.88	13.48	7.84	9.32	7.03	12.56	8.75	7.22	12.03	8.19	12.25	7.42
Na ₂ O	1.78	5.51	3.96	6.99	6.90	8.26	4.69	7.00	6.19	4.24	5.93	4.14	6.06
K ₂ O	0.05	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.14	0.28	0.13	0.30
Сумма	100.21	99.84	99.23	98.79	100.79	98.57	100.3	100.42	100.53	100.84	100.63	101.50	100.60
An, мол. %	88.78	60.10	74.09	48.47	53.15	41.65	69.22	51.22	49.47	70.43	53.69	71.29	50.68

Примечание. Для табл. 3–6: геологическая позиция и петрографический тип образцов соответствуют таковым в табл. 1.

Я – ядро вкрапленника, З – промежуточные зоны, К – краевая часть вкрапленника, М – микролиты.

часто с опацитовой каймой по краям и обычно включает обильные вроски плагиоклаза An_{48-63} . В андезибазальтовых и гибридных лавах Молодой Шивелуча амфибол наблюдается в редких клиновидных вкрапленниках, почти нацело опациitized или замещенных агрегатом пироксенов, плагиоклаза и рудного минерала. В $Ol-Hbl \pm Pl$ андезитах вкрапленники представлены паргаситовой роговой обманкой, в ядрах которой часто сохраняются реликты оливина и, реже, клинопироксена.

Изученные вкрапленники относятся к группе кальциевых амфиболов и на классификационных

диаграммах формируют две компактные группы соответствующие паргаситу и ряду магнезиальная роговая обманка–чермакит (рис. 8а, 8б). На графиках вариаций содержаний Al_2O_3 и Na_2O в зависимости от $Mg\#$ (рис. 8в, 8г) амфиболы вулкана Молодой Шивелуч обнаруживают два отчетливых тренда, которые соответствуют амфиболам различных петрографических типов. Паргаситовый амфибол $Ol-Hbl \pm Pl$ андезитов характеризуется устойчиво высокими содержаниями $Al_2O_3 = 11.8-15.2$ мас. %, $Na_2O = 2.0-2.5$ мас. % и умеренными концентрациями $TiO_2 = 0.9-1.7$ мас. % вне зависимости от

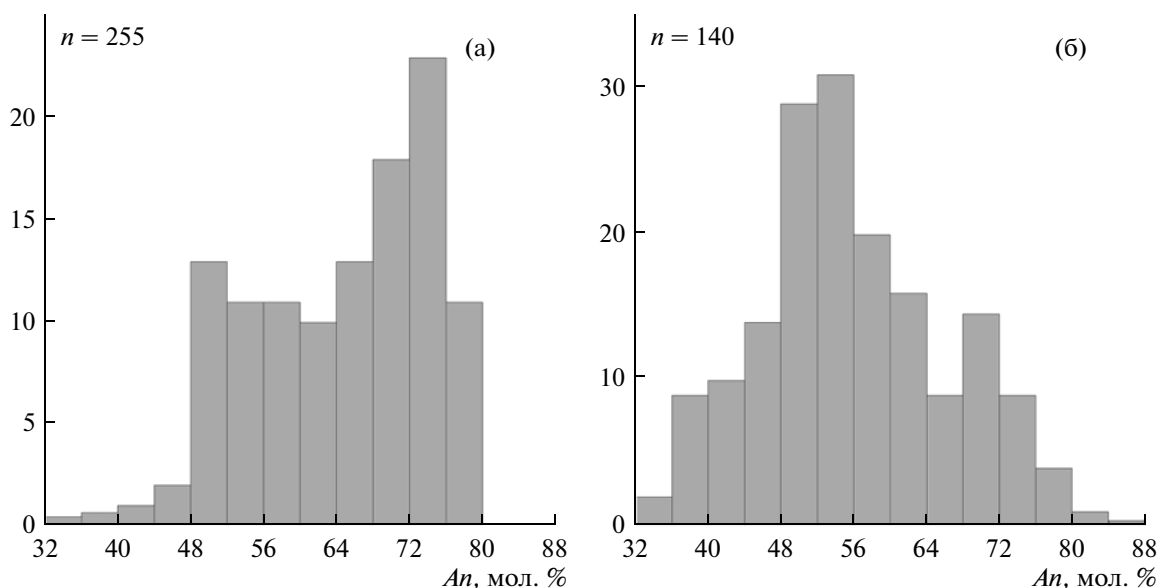


Рис. 6. Состав ядер и промежуточных зон вкрапленников плагиоклаза в андезитовых (а) и андезибазальтовых (б) лавах вулкана Молодой Шивелуч.

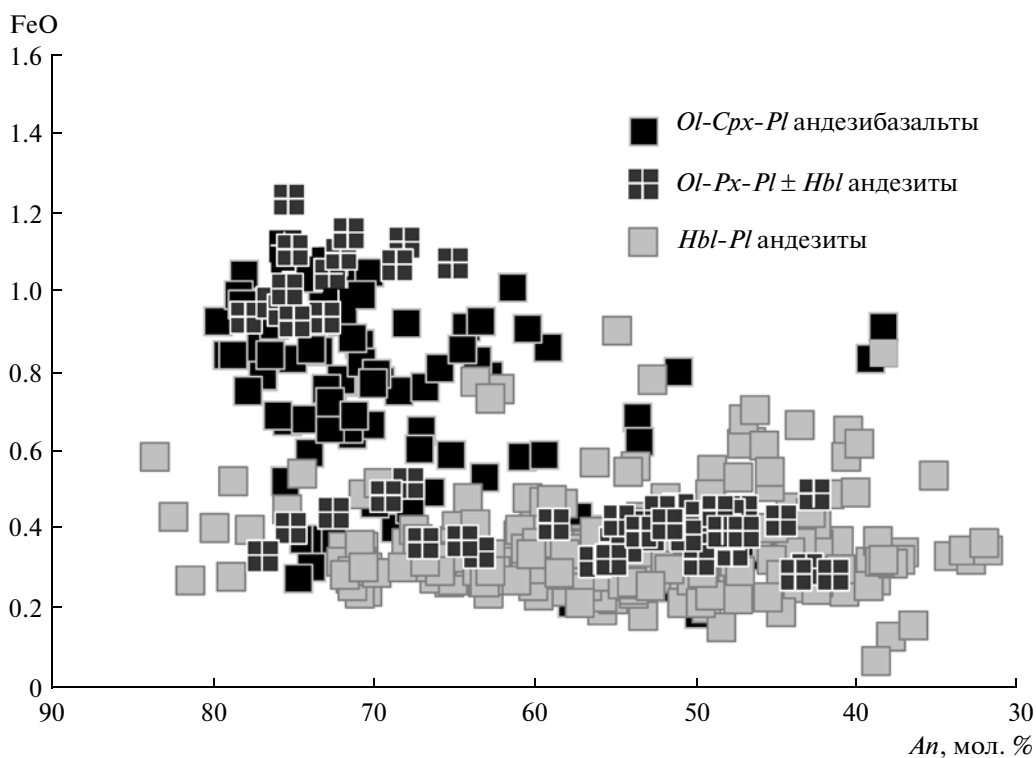


Рис. 7. Вариации содержания FeO относительно анортитовой составляющей в плагиоклазах различных петрографических типов пород вулкана Молодой Шивелуч.

Mg# (60–80 мол. %). Содержания глинозема и натрия в ядрах фенокристаллов роговой обманки *Hbl-Pl* андезитов широко варьируют ($Al_2O_3 = 6.6–13.6$ мас. %, $Na_2O = 1.4–2.7$ мас. %) и имеют сильную отрицательную корреляцию с величиной Mg#

(рис. 8в, 8г). В интервале Mg# 65–75 роговые обманки характеризуются также более высокими концентрациями TiO_2 (до 2.5 мас. %). При преобладании ядер и незональных вкрапленников с умеренным содержанием $Al_2O_3 = 8–11$ мас. % в отдель-

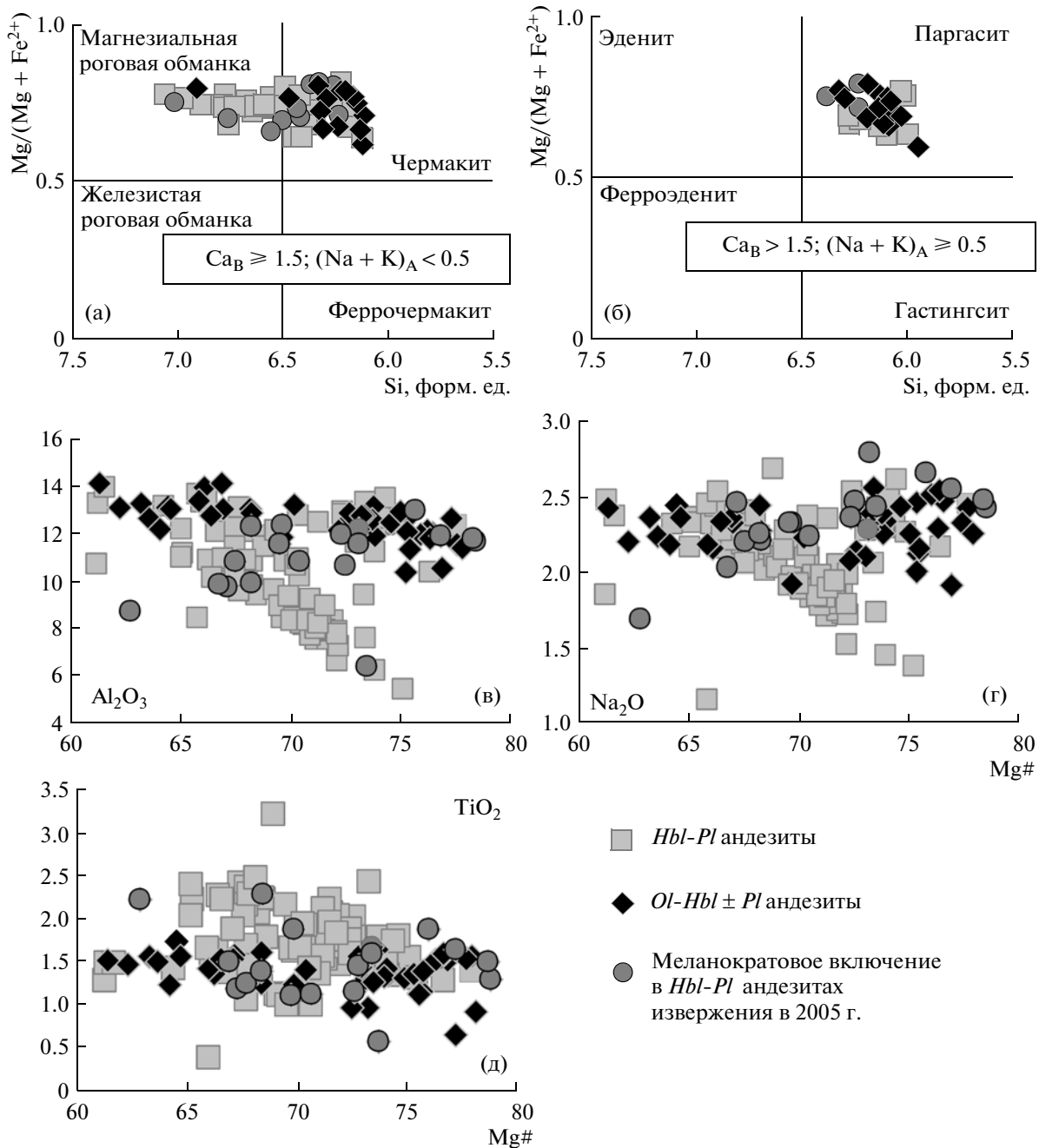


Рис. 8. Систематика вкрапленников амфибола (а, б) в различных петрографических типах пород вулкана Молодой Шивелуч.

Вариации содержаний Al₂O₃ (в), Na₂O (г), TiO₂ (д) в ядрах вкрапленников амфибола в зависимости от их магнезиальности.

ных образцах *Hbl-Pl* андезитов также присутствуют амфиболы с высокоглиноземистыми ядрами, близкими по составу к амфиболам из *Ol-Hbl ± Pl* андезитов. Вариации Al₂O₃, Na₂O, TiO₂ и Mg# характерны и для зональных вкрапленников амфибола *Hbl-Pl* андезитов (табл. 4). Наиболее типичной является зональность, выраженная в снижении содержаний указанных компонентов при увеличении магнезиальности от центра к краю зерен. В современных экструзивных лавах (обр. 7433, 7515, 7515-1, 7522)

встречается и “обратная” зональность — от центра к краям зерен фиксируется снижение магнезиальности и рост содержаний Al₂O₃, Na₂O и TiO₂.

Пироксены

В андезибазальтовых лавах количество клинопироксена составляет 7–10 об. %. В андезитах клинопироксен присутствует в виде единичных резорбированных вкрапленников и немногочисленных

Таблица 4. Представительные составы амфиболов (мас. %) лав вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	Обр. 7522											
	Я	З	К	Я	З	К	Я	К	Я	К	Я	К
SiO ₂	46.81	44.01	46.95	43.72	43.02	47.29	43.62	48.11	43.67	47.82	47.42	44.05
TiO ₂	1.42	2.16	0.99	1.46	2.39	2.03	2.22	1.43	2.03	1.75	1.76	2.43
Al ₂ O ₃	9.43	11.46	10.20	13.08	12.19	7.86	12.45	7.61	11.02	7.24	8.20	11.63
FeO	10.68	12.41	11.61	11.98	13.15	11.28	10.71	10.70	13.34	11.18	11.70	10.06
MnO	0.28	0.24	0.32	0.32	0.36	0.32	0.18	0.28	0.31	0.31	0.29	0.19
MgO	16.67	14.54	15.64	14.15	13.79	16.14	15.05	16.79	13.97	16.42	15.81	15.41
CaO	10.97	11.42	11.27	11.61	11.63	11.63	12.06	11.49	11.71	11.60	11.45	12.40
Na ₂ O	2.06	2.41	2.10	2.32	2.33	1.91	2.36	1.74	2.17	1.72	1.84	2.28
K ₂ O	0.23	0.45	0.23	0.49	0.51	0.33	0.47	0.30	0.62	0.29	0.38	0.49
Cr ₂ O ₃	0.16	0.26	0.13	0.54	0.02	0.01	0.13	0.06	0.01	0.00	0.16	0.28
Сумма	98.71	99.37	99.43	99.68	99.39	98.79	99.26	98.51	98.85	98.33	99.01	98.87
Mg#	73.56	67.62	70.60	67.80	65.15	71.83	71.47	73.64	65.12	72.36	70.66	73.19
	Обр. 7516-1											
	Я	З	З	К	Я	З	К	Я	З	К	Я	К
SiO ₂	42.37	44.69	43.43	44.33	40.87	43.17	42.63	43.08	42.2	43.04	43.96	41.86
TiO ₂	1.74	1.34	1.25	1.51	1.47	1.42	1.08	1.64	1.53	1.56	1.35	1.52
Al ₂ O ₃	13.09	11.90	13.06	12.04	15.21	13.14	12.91	12.74	14.11	13.05	12.93	14.13
FeO	13.13	10.11	12.34	9.21	15.26	9.85	16.04	10.21	12.08	13.25	9.32	14.18
MnO	0.27	0.16	0.16	0.15	0.25	0.12	0.48	0.11	0.20	0.24	0.15	0.24
MgO	13.38	16.2	14.91	17.04	11.12	15.72	12.19	15.94	13.77	13.6	15.86	12.63
CaO	11.63	11.51	11.35	11.36	11.79	11.78	10.79	11.82	12.00	11.57	12.17	11.63
Na ₂ O	2.45	2.34	2.45	2.48	2.22	2.26	2.08	2.57	2.37	2.37	2.26	2.43
K ₂ O	0.47	0.39	0.40	0.43	0.62	0.59	0.40	0.60	0.61	0.45	0.60	0.50
Cr ₂ O ₃	0.05	0.14	0.00	0.12	0.00	0.02	0.00	0.03	0.10	0.12	0.16	0.00
Сумма	98.59	98.78	99.35	98.67	98.8	98.07	98.6	98.74	98.98	99.25	98.75	99.12
Mg#	64.49	74.07	68.29	76.73	56.5	73.99	57.53	73.56	67.02	64.66	75.21	61.35
	Обр. 7500						Обр. 7499-4					
	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К	М	М
SiO ₂	44.43	45.48	44.79	47.83	44.27	43.08	44.22	48.51	45.77	44.85	44.58	44.46
TiO ₂	2.41	2.22	2.36	1.79	1.37	1.71	1.88	1.18	1.50	1.63	1.11	1.39
Al ₂ O ₃	10.54	9.78	10.09	7.55	12.08	12.74	12.98	9.74	9.86	11.91	11.58	12.29
FeO	12.63	12.40	12.42	11.57	12.75	11.51	9.02	12.54	13.12	9.07	11.78	12.11
MnO	0.32	0.21	0.30	0.23	0.29	0.12	0.06	0.41	0.25	0.11	0.16	0.27
MgO	14.61	15.07	14.56	16.17	14.37	15.43	15.96	14.44	14.84	17.13	15.18	14.66
CaO	11.51	11.66	11.53	11.66	11.75	11.79	12.18	10.87	11.38	11.68	11.89	11.67
Na ₂ O	2.29	2.11	2.17	1.71	2.16	2.38	2.67	2.47	2.04	2.56	2.33	2.26
K ₂ O	0.47	0.46	0.46	0.32	0.45	0.54	0.25	0.42	0.41	0.23	0.22	0.59
Cr ₂ O ₃	0.02	0.05	0.09	0.03	0.00	0.01	0.06	0.10	0.13	0.07	0.52	0.16
Сумма	99.23	99.44	98.76	98.86	99.49	99.31	99.28	100.68	99.31	99.24	99.35	99.86
Mg#	67.34	68.42	67.63	71.36	66.77	70.50	75.93	67.24	66.84	77.10	69.67	68.33

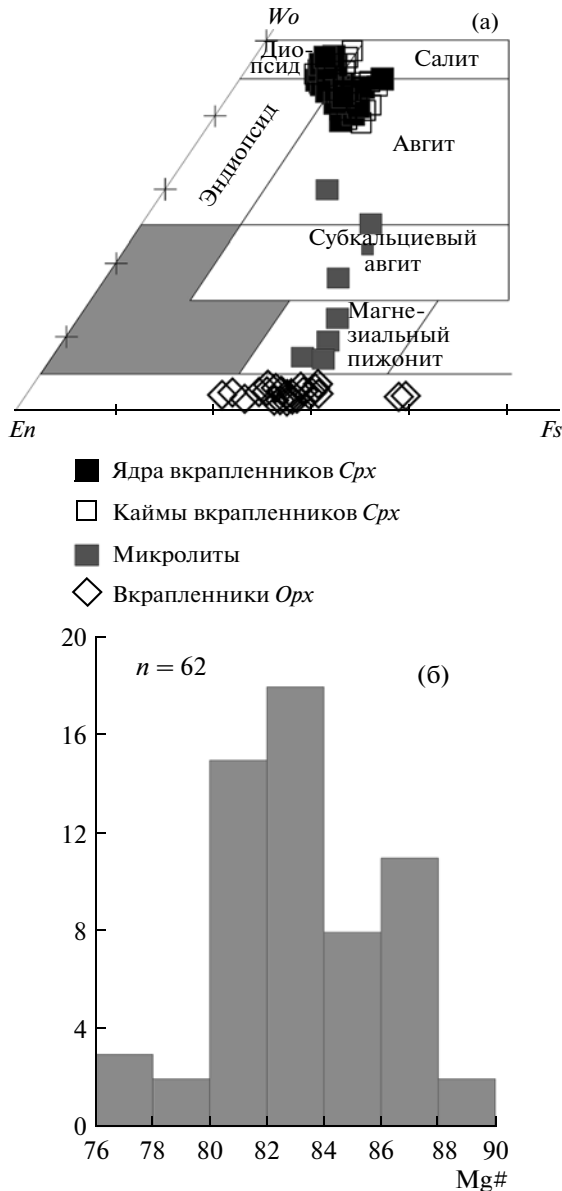


Рис. 9. Систематика вкрапленников пироксена в андезибазальтовых лавах вулкана Молодой Шивелуч (а), распределение магнезиальности в ядрах вкрапленников клинопироксена андезибазальтовых лав (б).

микролитов, а количество ортопироксена составляет 2–3% от объема породы. Состав вкрапленников клинопироксена андезибазальтов отвечает авгиту и диопсид-авгиту $Wo_{42-47} En_{40-48} Fs_{6-14}$ (рис. 9а, табл. 5). Интервал магнезиальности ядер фенокристаллов составляет Mg# 75.7–88.7. На гистограммах четко выделяются два максимума, соответствующие Mg# 80–84 и 86–88 (рис. 9б). При понижении магнезиальности клинопироксенов содержания TiO_2 и Al_2O_3 закономерно возрастают (рис. 10а, 10б), а концентрации хрома резко снижаются (рис. 9в).

Во вкрапленниках преобладает прямая зональность с уменьшением магнезиальности от центра к

краю кристаллов. Хорошо выраженная обратная зональность отмечена в клинопироксенах $Ol-Px-Pl \pm Hbl$ андезита (обр. 7487, табл. 5). Ядра таких фенокристаллов имеют Mg# 78–79, а краевые зоны Mg# 81–85. Немногочисленные вкрапленники и микролиты клинопироксена в андезитовых лавах с составом $Wo_{39-40} En_{44-45} Fs_{15-16}$ эволюционируют в сторону субкальциевого авгита и пижонита.

Ортопироксен ($En_{67-74} Fs_{30-24} Wo_{3-2}$) образует призматические зерна размером от первых долей миллиметра до 1 мм. Магнезиальность ядер вкрапленников ортопироксена андезитовых лав варьирует в пределах Mg# 69–76. Высокомагнезиальные ортопироксены (Mg# 80–85) были встречены только в составе реакционных кайм вокруг оливина. В современных экструзивных лавах присутствуют кристаллы с обратной зональностью, внешние зоны которых характеризуются более высоким содержанием кальция и магнезиальностью (Mg# 72–74) в сравнении с ядрами вкрапленников (Mg# 69–70).

Оливин

Оливин присутствует во всех типах лав — от 5–7 об. % в андезибазальтах до единичных резорбированных или заключенных в реакционную $Px-Hbl-Mt$ кайму зерен в кислых лавах. Наиболее идиоморфные фенокристаллы отмечены в $Ol-Px-Pl \pm Hbl$ андезибазальтах и андезитах лав северо-восточного склона. В гетеротакситовых лавах оливины корродированны и часто образуют зернистым агрегатом пироксенов. Редкие вкрапленники оливина $Ol-Hbl \pm Pl$ андезитов имеют опалитовую кайму или окружены зернами амфибола.

Общий интервал магнезиальности ядер вкрапленников оливина лав вулкана Молодой Шивелуч составляет Fo_{84-92} (рис. 11а, 11б; табл. 6). Наиболее магнезиальные оливины Fo_{90-92} были обнаружены в меланократовом включении (обр. 7499-4) в андезитах извержения в 2005 г. Состав оливинов включения близок к составу наиболее магнезиальных оливинов, описанных для вулкана (Волынец и др., 1997), и присутствующих в тefре $Ol-Cpx-Hbl \pm Pl$ базальтов извержения 3600 ^{14}C лет. Состав вкрапленников оливина андезитовых и андезибазальтовых лав несколько более железистый и варьирует в интервале от $Fo_{84-89.5}$ при резком преобладании Fo_{86-88} (рис. 11). Все вкрапленники андезитовых и андезибазальтовых лав имеют нормальную зональность, состав краевых зон отвечает Fo_{73-85} . При уменьшении магнезиальности оливина содержания CaO остаются практически постоянными (0.08–0.12 мас. %), концентрации MnO (0.1–0.25 мас. %) увеличиваются, NiO (0.5–0.1 мас. %) понижаются. Оливины Fo_{88-90} гибридных лав (обр. 7487) характеризуются более высокими содержаниями NiO по сравнению с оливинами из меланократового включения и $Ol-Hbl-Cpx \pm Pl$ базальтов.

Таблица 5. Представительные составы пироксенов (мас. %) пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	Обр. 7496						Обр. 7487					
	Срх			Орх			Срх					
	Я	Я	К	Я	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К
SiO ₂	51.23	51.92	49.97	53.36	54.83	54.85	52.57	50.6	53.11	50.13	52.27	47.79
TiO ₂	0.58	0.57	0.54	0.16	0.13	0.08	0.19	0.55	0.23	0.68	0.29	1.39
Al ₂ O ₃	2.54	2.32	3.33	0.81	0.52	0.41	1.08	3.85	0.93	3.80	1.99	6.45
FeO	4.71	4.68	8.41	16.28	16.42	18.04	7.42	6.15	6.97	5.87	5.57	9.39
MnO	0.12	0.15	0.30	0.50	0.55	1.06	0.20	0.01	0.15	0.02	0.02	0.08
MgO	16.14	16.59	15.05	26.42	26.82	25.28	14.77	15.00	14.82	15.62	16.67	13.70
CaO	22.44	22.03	21.12	1.03	0.81	0.86	22.01	22.10	22.56	21.94	21.89	21.03
Na ₂ O	0.28	0.26	0.21	0.03	0.06	0.00	0.00	0.03	0.32	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.67	0.42	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.23	0.32	0.00
Сумма	98.72	98.95	98.98	98.61	100.2	100.58	98.25	98.45	99.12	98.29	99.04	99.88
Mg#	87.16	87.53	77.99	76.27	76.39	73.51	79.75	82.85	80.82	84.06	85.57	74.29
	Обр. 7487						Обр. 7499-4					
	Срх		Орх				Срх					
	М	М	Я	К	Я	К	М	М	Я	К	Я	К
SiO ₂	51.47	50.25	54.82	54.79	54.97	55.01	52.98	52.18	53.05	51.99	51.23	52.71
TiO ₂	0.35	0.52	0.10	0.09	0.06	0.06	0.29	0.52	0.14	0.20	0.39	0.14
Al ₂ O ₃	2.48	3.69	0.38	0.77	0.29	0.34	1.56	1.94	1.60	1.17	2.84	1.18
FeO	5.48	5.84	17.16	17.89	17.51	17.23	14.66	10.64	4.29	9.74	5.66	8.25
MnO	0.04	0.03	0.61	0.66	1.01	0.94	0.51	0.30	0.00	0.52	0.01	0.32
MgO	16.33	15.21	26.17	25.36	25.74	26.32	24.64	18.93	16.98	15.66	15.28	14.01
CaO	22.23	22.06	0.88	0.94	0.79	0.67	1.74	14.48	22.21	19.56	22.62	21.8
Na ₂ O	0.05	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.08
Cr ₂ O ₃	0.42	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.25	0.00
Сумма	98.88	99.83	100.13	100.53	100.39	100.61	96.39	99	98.7	98.88	98.29	98.51
Mg#	85.51	83.77	75.12	73.74	74.43	75.15	76.9	77.89	88.69	76.11	84.23	77.07
	Обр. 7499-4					Обр. 7433						
	Срх		Орх			Срх			Орх			
	Я	К	Я	К	к ОI	Я	М	М	Я	Я	М	М
SiO ₂	53.98	51.7	55.39	55.42	54.14	53.16	51.00	50.99	53.98	53.2	53.49	52.58
TiO ₂	0.15	0.51	0.07	0.08	0.00	0.25	0.63	0.74	0.11	0.16	0.28	0.23
Al ₂ O ₃	1.08	3.44	0.48	0.22	3.16	1.45	1.92	1.84	0.52	1.76	0.88	0.83
FeO	5.10	6.85	18.11	17.51	13.01	7.01	9.73	9.58	18.08	17.56	16.53	16.00
MnO	0.00	0.01	0.92	0.98	0.43	0.11	0.33	0.32	0.75	0.64	0.54	0.48
MgO	16.13	14.72	24.52	24.46	27.9	16.15	15.31	15.65	25.50	25.77	26.08	26.62
CaO	22.52	22.75	0.73	0.43	0.94	20.89	19.25	19.06	1.21	0.97	1.19	1.51
Na ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.31	0.47	0.49	0.03	0.03	0.04	0.03
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	98.97	100.08	100.24	99.14	99.6	99.36	98.70	98.72	100.20	100.13	99.12	98.28
Mg#	86.23	80.98	72.84	73.44	80.94	82.03	75.70	76.39	73.64	74.40	75.76	76.72

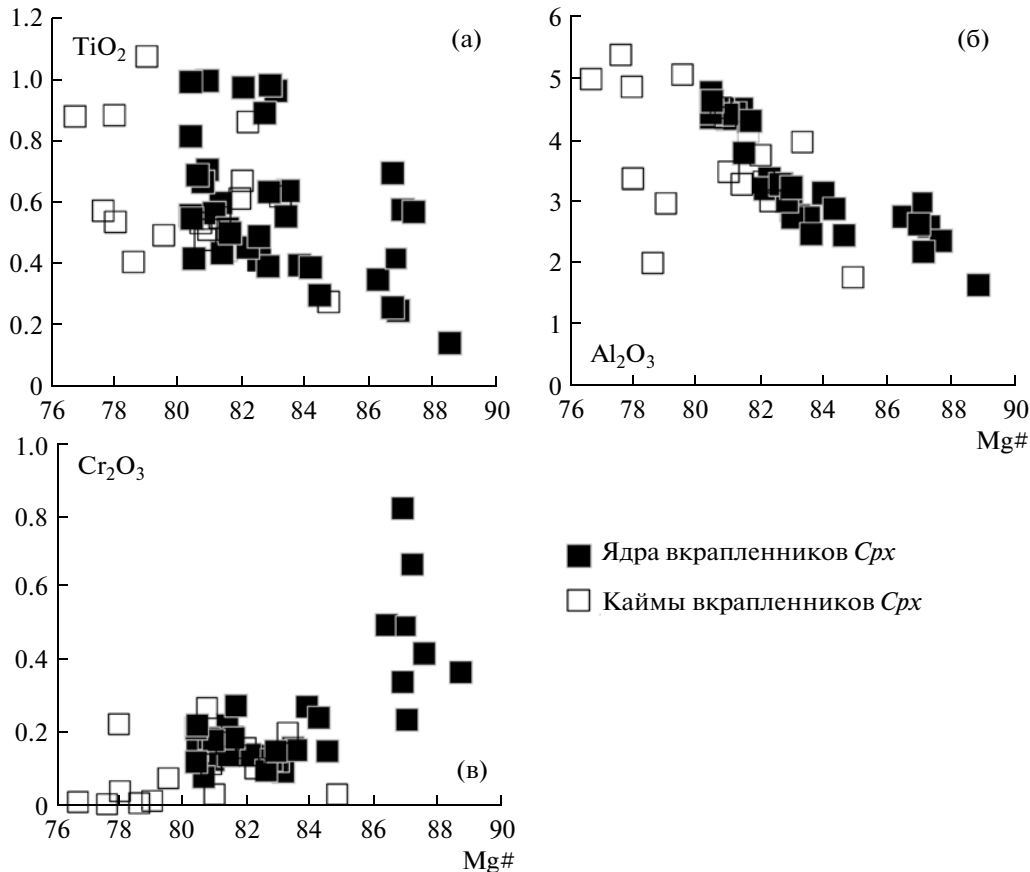


Рис. 10. Вариации содержаний TiO_2 (а), Al_2O_3 (б), Cr_2O_3 (в) в клинопироксенах андезитобазальтовых лав вулкана Молодой Шивелуч в зависимости от их магнезиальности.

Фенокристаллы оливина включают мелкие выделения хромистой шпинели, иногда в виде обильных нитевидных скоплений. По величине хромистости $\text{Cr}\#$ 65.4–76.2 и содержанию $\text{TiO}_2 = 0.26$ –1.02 мас. % хромшпинелиды Молодого Шивелуча близки к составам этого минерала из базальтов вулкана Ключевской (Хубуная и др., 1993), но характеризуются более широкими вариациями величины $\text{Mg}\#$ 29–61 (табл. 7). Точки составов шпинелей Молодого Шивелуча, сосуществующих с наиболее магнезиальным оливином (рис. 12), расположены в поле пород мантийного ряда (Arai, 1994), что свидетельствует об их кристаллизации из примитивных расплавов, близких исходным мантийным магмам.

ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД

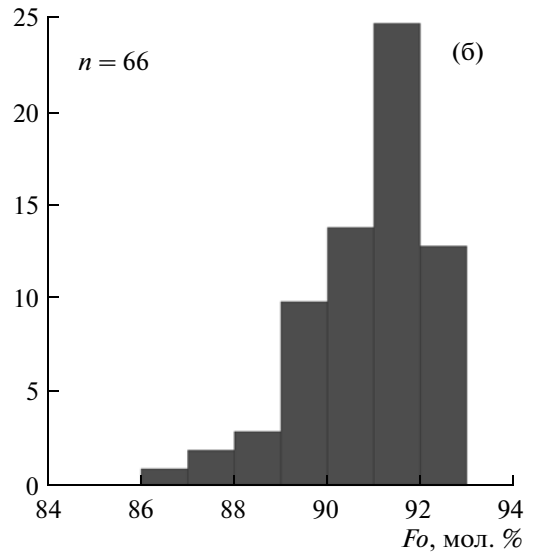
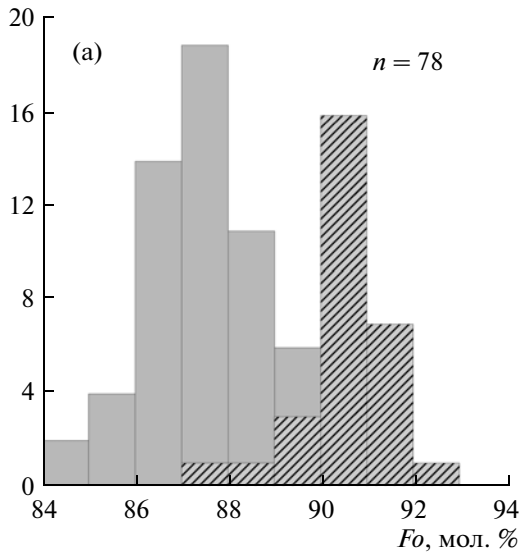
Состав пород лавового комплекса Молодого Шивелуча приведен в табл. 2. Большая часть лав отвечает по составу магнезиальным андезитам и анде-

зитобазальтам с содержанием $\text{SiO}_2 = 55.0$ –63.5 мас. % и $\text{Mg}\#$ 55.5–68.9 мол. % и относится к умеренно-кальциевой известково-щелочной серии (рис. 13). Наиболее основными породами, обнаруженными в составе лавового комплекса, являются *Ol-Cpx-Hbl* ± *Phl* базальты ($\text{SiO}_2 = 50.5$ –51.0 мас.%, $\text{Mg}\#$ 69.4–71.7 мол. %), принадлежащие, как и тефра извержения 3600 ^{14}C лет, к высококальциевой серии (рис. 13б).

Вариации главных и редких элементов в лавах Молодого Шивелуча показаны на рис. 14 и 15. При уменьшении содержания MgO от 9.43 до 3.32 мас. % в породах наблюдается накопление Al_2O_3 (от 15.34 до 16.89 мас. %), Na_2O (от 3.20 до 4.90 мас. %), K_2O (от 0.73 до 1.49 мас. %). Концентрации TiO_2 , FeO , CaO , P_2O_5 слабо возрастают или остаются постоянными по мере уменьшения MgO до ~4–5 мас. % и снижаются в более дифференцированных породах ($\text{TiO}_2 = 0.80$ –0.48 мас. %, $\text{FeO} = 8.29$ –4.28 мас. %, $\text{CaO} = 10.5$ –6.5 мас. %, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.73$ –0.49 мас. %).

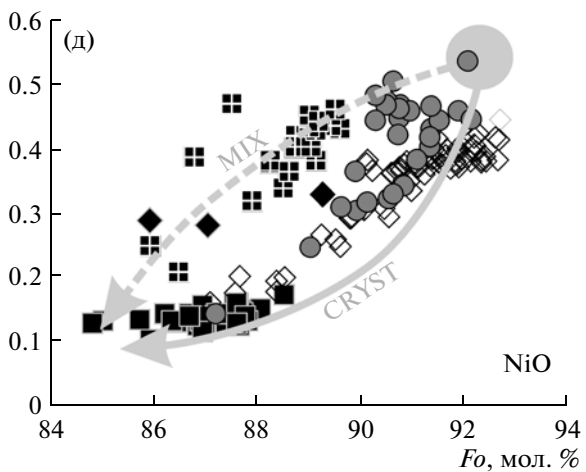
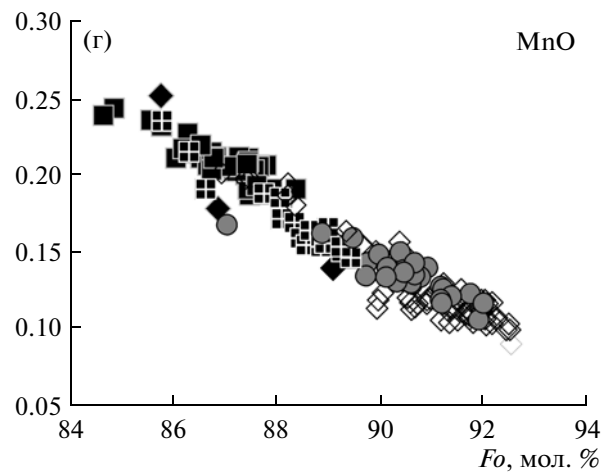
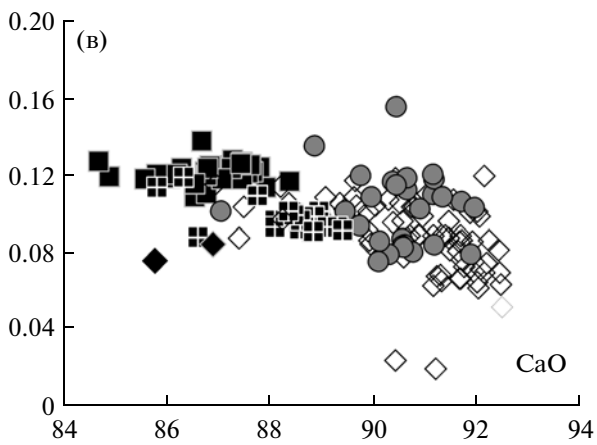
Рис. 11. Состав ядер вкрапленников оливина в породах вулкана Молодой Шивелуч (а, б).

Вариации содержаний CaO (в), MnO (г) и NiO (д) в оливинах различных петрографических типов. Сплошной линией на графике (д) обозначен тренд фракционной кристаллизации, пунктирной – тренд смешения примитивного и дифференцированного расплава.



Лавы влк. Молодой Шивелуч
 Меланократовое включение в *Hbl-Pl* андезитах извержения в 2005 г.

Ol-Cpx-Hbl±Pl базальты извержения 3600 ¹⁴С лет



Ol-Cpx-Pl андезибазальты

Ol-Px-Pl±Hbl андезиты

Ol-Hbl±Pl андезиты

Ol-Cpx-Hbl±Pl базальты извержения 3600¹⁴С лет

Меланократовое включение в *Hbl-Pl* андезитах извержения в 2005 г.

Таблица 6. Представительные составы фенокристаллов оливина (мас. %) лав вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	Обр. 7482				Обр. 7487							
	Я	К	Я	К	Я	Я	Я	К	Я	К	Я	К
SiO ₂	40.97	39.37	40.77	39.27	41.03	41.33	41.15	40.89	41.06	39.75	40.59	40.6
FeO	11.87	19.02	12.00	19.78	10.27	10.72	10.74	13.14	10.79	17.93	13.71	15.39
MnO	0.20	0.38	0.20	0.367	0.14	0.16	0.15	0.20	0.15	0.35	0.23	0.27
MgO	48.08	42.3	47.98	41.69	48.99	48.78	48.43	46.88	48.41	42.83	46.56	45.3
CaO	0.12	0.13	0.12	0.13	0.09	0.09	0.10	0.16	0.09	0.10	0.11	0.11
NiO	0.15	0.07	0.13	0.05	0.43	0.38	0.40	0.23	0.45	0.07	0.24	0.12
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.00
Сумма	101.44	101.28	101.23	101.3	101	101.48	100.99	101.49	100.99	101.05	101.48	101.8
F ₀ , мол. %	87.83	79.86	87.7	78.98	89.47	89.02	88.94	86.41	88.88	80.98	85.82	83.99
	Обр. 7516-1				Обр. 7499-4							
	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К	Я	К
SiO ₂	40.92	39.94	40.74	40.41	41.6	41.43	41.6	40.37	41.24	40.88	41.34	40.72
FeO	10.50	15.50	12.72	14.08	7.81	7.94	8.10	15.34	9.20	11.07	9.25	13.3
MnO	0.13	0.31	0.17	0.21	0.11	0.1	0.12	0.34	0.13	0.15	0.13	0.21
MgO	48.34	45.22	47.37	46.11	50.66	50.95	50.76	45.07	49.91	48.67	49.5	46.61
CaO	0.32	0.06	0.08	0.07	0.10	0.08	0.10	0.12	0.09	0.11	0.15	0.12
NiO	0.33	0.26	0.28	0.21	0.44	0.53	0.46	0.13	0.45	0.27	0.50	0.14
Cr ₂ O ₃	0.25	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.06	0.01	0.03	0.05	0.55	0.02
Сумма	100.79	101.29	101.38	101.1	100.79	101.09	101.19	101.37	101.05	101.22	101.43	101.12
F ₀ , мол. %	89.14	83.87	86.91	85.37	92.04	91.96	91.78	83.97	90.62	88.68	90.51	86.21
	Обр. 7499-4				Обр. К1-18б							
	Я	К	Я	Я	Я	Я	Я	Я	Я	Я	Я	Я
SiO ₂	41.42	40.55	41.18	40.77	40.59	40.49	40.43	40.24	40.48	40.14	39.81	39.96
FeO	10.25	13.43	10.81	7.26	7.82	8.24	8.75	9.26	10.03	11.40	12.00	12.52
MnO	0.15	0.21	0.16	0.09	0.11	0.10	0.12	0.13	0.15	0.18	0.20	0.20
MgO	49.07	46.88	48.64	50.71	50.42	50.04	49.63	49.31	48.81	47.95	47.2	46.84
CaO	0.10	0.11	0.13	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.11	0.11	0.10	0.11
NiO	0.31	0.13	0.24	0.44	0.38	0.4	0.37	0.36	0.29	0.19	0.20	0.16
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02
Сумма	101.35	101.34	101.19	99.42	99.49	99.45	99.51	99.52	99.95	100.05	99.56	99.86
F ₀ , мол. %	89.51	86.15	88.91	92.57	92.00	91.55	91.01	90.47	89.67	88.23	87.52	86.96

CaO = 8.25–5.38 мас. %, P₂O₅ = 0.25–0.06 мас. %). Аналогичное поведение характерно для V (233–106 г/т), Zn (82–51 г/т) и Y (25–8 г/т). В интервале от 9.5 до 5 мас. % MgO породы резко обедняются Sr (от 563 до 167 г/т) и Ni (от 173 до 31 г/т). Концентрации Sr и Ni в лавах с содержанием MgO < 5 мас. % составляют 154–94 и 39–14 г/т соответственно. Распределение содержаний Sr и Ga сходно поведению алюминия – при уменьшении содержания MgO характерно накопление этих элементов (Ga = 14–20 г/т, Sr = 328–654 г/т). Содержания несовместимых элементов в породах (Ba, Rb, Zr) увеличиваются приблизительно в 1.5 раза по мере обеднения MgO.

Аномальное обогащение стронцием (1004 г/т) и барием (608 г/т) отмечено для лав экструзии горы Каран. *Ol-Cpx-Hbl±Phl* базальты резко выделяются из единых трендов лав и пирокластике Молодого Шивелуча повышенными содержаниями K₂O = 1.93 мас. %, P₂O₅ = 0.41 мас. %, Rb = 45 г/т, Ba = 475 г/т, Sr = 485 г/т и Y = 22 г/т.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Роль кристаллизационной дифференциации

Точки составов пород лавового комплекса и проксимальных пирокластических отложений вулкана Молодой Шивелуч формируют единые эволюционные тренды относительно MgO. В качестве родоначальной магмы может рассматриваться состав базальтовой тефры извержения 7600 ¹⁴C лет (Вольнец и др., 1997; Ponomareva et al., 2007), который характеризуется максимальными содержаниями мафических компонентов (Mg, Fe, Cr, Ni) и минимальными содержаниями несовместимых литофильных компонентов (K, Rb, Ba) из всей серии пород Молодого Шивелуча (рис. 13, 14). Доминирующее влияние на тренд изменения составов магм оказывала кристаллизация железомagneзиевых силикатов и оксидов: парагенезиса *Ol ± Slp + Cpx* в андезибазальтовых лавах, сменяющегося на парагенезис *Hbl ± Px + Mt* в андезитах, что определяет закономерное понижение CaO, FeO, MnO, TiO₂, Cr, Ni, V и увеличение SiO₂, Na₂O, K₂O, Rb, Ba с уменьшением содержания MgO в породах. Появление апатита на ликвидусе фиксируется при MgO ~ 4–5 мас. % по излому тренда P₂O₅ при уменьшении MgO.

Парадоксально, но характер тренда фракционирования пород Молодого Шивелуча, на первый взгляд, не отражает присутствия в породах плагиоклаза преобладающей минеральной фазы большинства изученных пород (за исключением *Ol-Hbl±Pl* андезитов и *Ol-Cpx-Hbl±Phl* базальтов), составляющей от 1/2 до 2/3 общего объема всех вкрапленников. Накопление Al₂O₃ и Sr с повышением содержания SiO₂ и с уменьшением MgO в магмах (рис. 14, 15) находится в противоречии с большим количеством кристаллизующегося плагиоклаза и данными по составу расплавных включений в андезитах, в которых

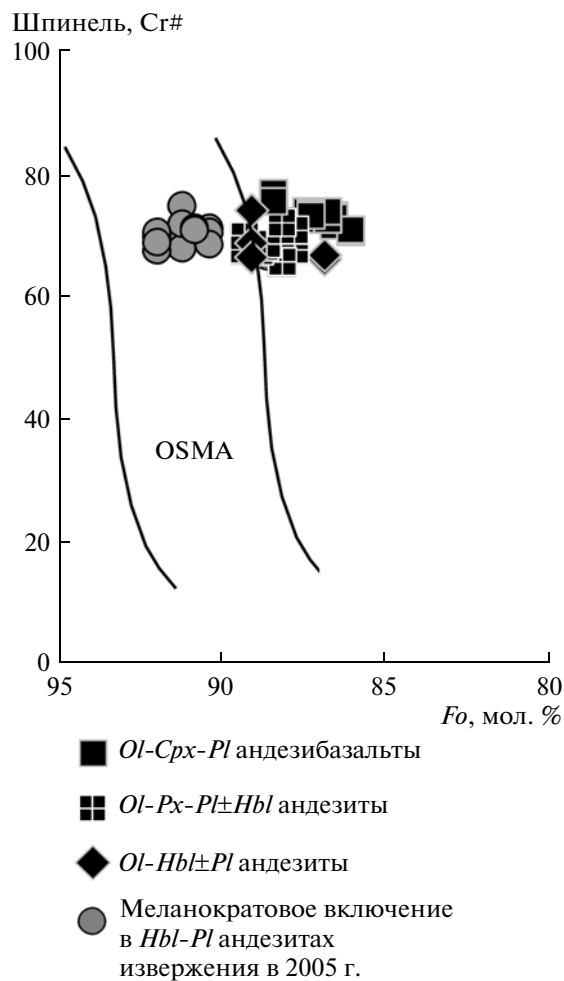


Рис. 12. Состав включений шпинели во вкрапленниках оливина лав вулкана Молодой Шивелуч. OSMA – поле оливин-шпинелевого парагенезиса мантийных пород по (Arai, 1994).

содержания Sr не превышают 360 г/т и обратно коррелируют с SiO₂ (Толстых и др., 2003; Humphreys et al., 2008).

Данный факт свидетельствует о том, что процессы неполного удаления кристаллов плагиоклаза из кристаллизующегося расплава могли оказывать существенное влияние на валовый состав извергнутых магм, поддерживая валовое содержание Al₂O₃ и Sr в магмах на уровне более высоком, чем в равновесном расплаве на каждом последующем этапе фракционирования. Резкая и разнообразная по типу зональность в плагиоклазах одного образца (рис. 5) свидетельствует в пользу такой модели и подразумевает длительное нахождение (рециклинг) плагиоклазов в магмах и их взаимодействие с расплавами разного состава. Напротив, сложная зональность не характерна для Fe-Mg силикатов в породах Молодого Шивелуча. Эти минералы, обладающие более высокой плотностью (оливин, амфибол, пироксены), чем плагиоклаз,

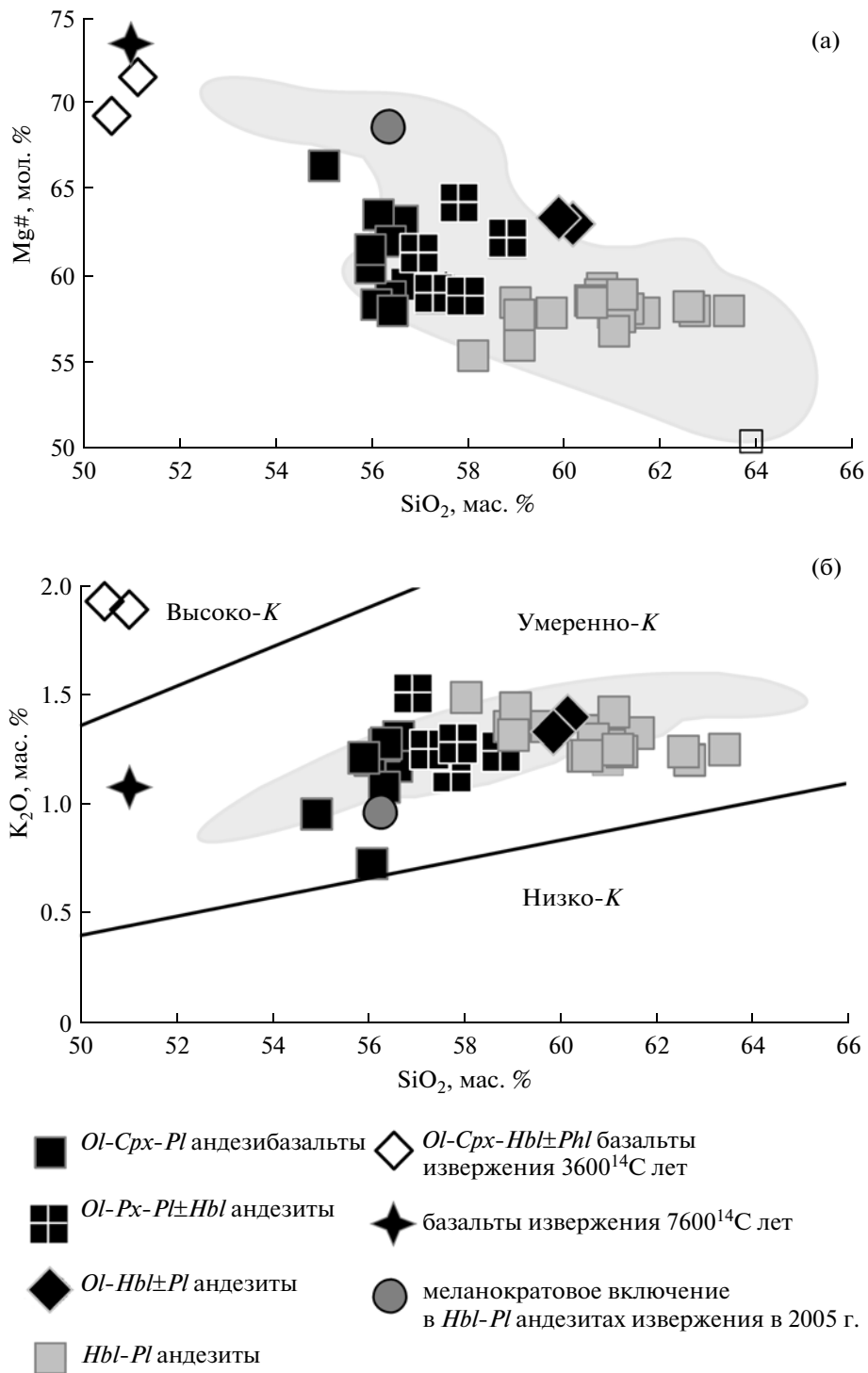


Рис. 13. Состав пород лавового комплекса Молодого Шивелуча в координатах SiO_2 – Mg\# (а), SiO_2 – K_2O (б). Состав базальтов извержения 7600 ¹⁴С лет, согласно (Вольнец и др., 1997). Серое поле – состав проксимальных пирокластических отложений Молодого Шивелуча (Ponomareva et al., 2007).

могли более эффективно удаляться из кристаллизующейся системы путем гравитационной дифференциации, что оказывало доминирующий эффект на состав эволюционирующих магм.

Высокие “адакитовые” отношения Sr/Y (30–71) и низкие содержания Y (<18 г/т) являются характерной особенностью андезитов Молодого Шивелуча (рис. 16) и интерпретируются во многих

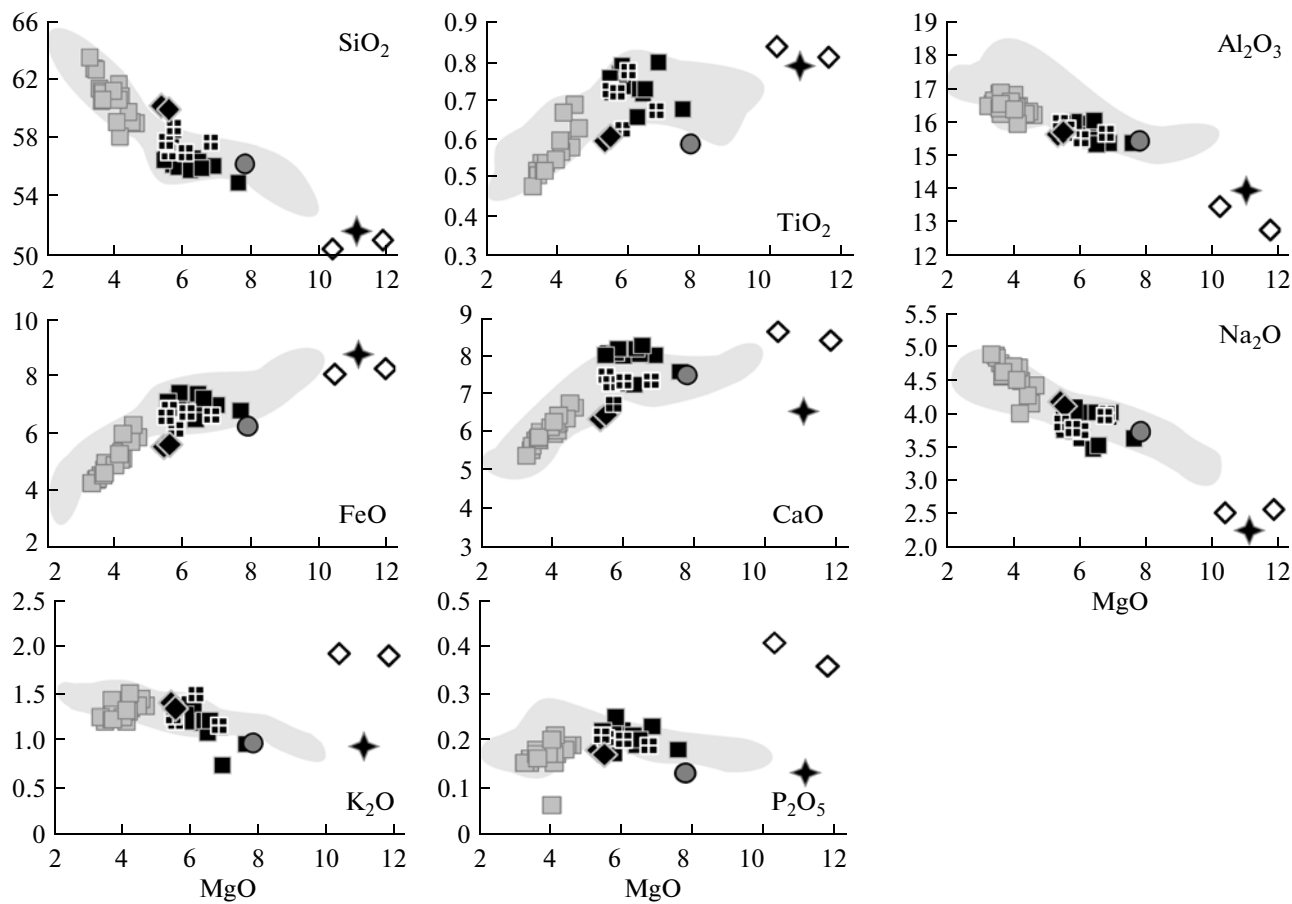


Рис. 14. Вариации содержаний главных петрогенных оксидов в породах вулкана Молодой Шивелуч относительно MgO. Условные обозначения см. на рис. 13.

работам как важное свидетельство участия продуктов плавления субдуцирующей плиты (эклогита) в происхождении магм вулкана (например, Yagodzinski et al., 2001; Churikova et al., 2001). Критически анализируя эту гипотезу, следует отметить, что составы пород Молодого Шивелуча располагаются в переходной области, между составами типичных островодужных магм ($Sr/Y < 40$, (Defant, Drummond, 1990)) и породами с явно выраженной “адакитовой” спецификой ($Sr/Y > 100$, $La/Yb > 20$), например таких как магнезиальные андезиты, драгированные на западном фланге Командорского блока (Yagodzinski et al., 1995) или андезиты о. Кука, Чили (Stern, Kilian, 1996). Как обсуждалось в литературе в последние годы, плавление эклогитов (в субдуцирующей плите или в низах коры) не является единственным объяснением генезиса пород переходного к адакитам состава. Породы с умеренно высоким отношением Sr/Y могут происходить в результате коровой дифференциации магм с низким исходным отношением Sr/Y , которое характерно для типичных островодужных магм (например, Richards, Kerrich, 2007; Moyen, 2009).

В породах вулкана Молодой Шивелуч отношение Sr/Y положительно коррелирует с SiO_2 (рис. 16). Максимальные отношения Sr/Y характерны для наиболее дифференцированных разностей, имеющих наиболее высокие содержания Sr и минимальные — Y . Как обсуждалось выше, высокие содержания Sr в дифференцированных породах могут объясняться неполной сепарацией вкрапленников плагиоклаза от расплава при фракционировании магм. Содержание Y в породах остаются на приблизительно постоянном уровне в интервале содержания $SiO_2 = 53–59$ мас. % и резко снижаются в более дифференцированных породах. Среди главных минеральных фаз в лавах Молодого Шивелуча доминирующее влияние на содержания Y и тяжелых РЗЭ оказывает амфибол, имеющий коэффициенты распределения для этих элементов ≥ 1 (Brophy, 2008). Как показывает моделирование разнообразных сценариев частичного плавления пород коры и кристаллизации магм при различных глубинах (Brophy, 2008), такое поведение Y при увеличении содержания SiO_2 соответствует фракционированию магм с участием амфибола в верхне- и среднекоровых условиях. Совместный эффект кристаллизации ам-

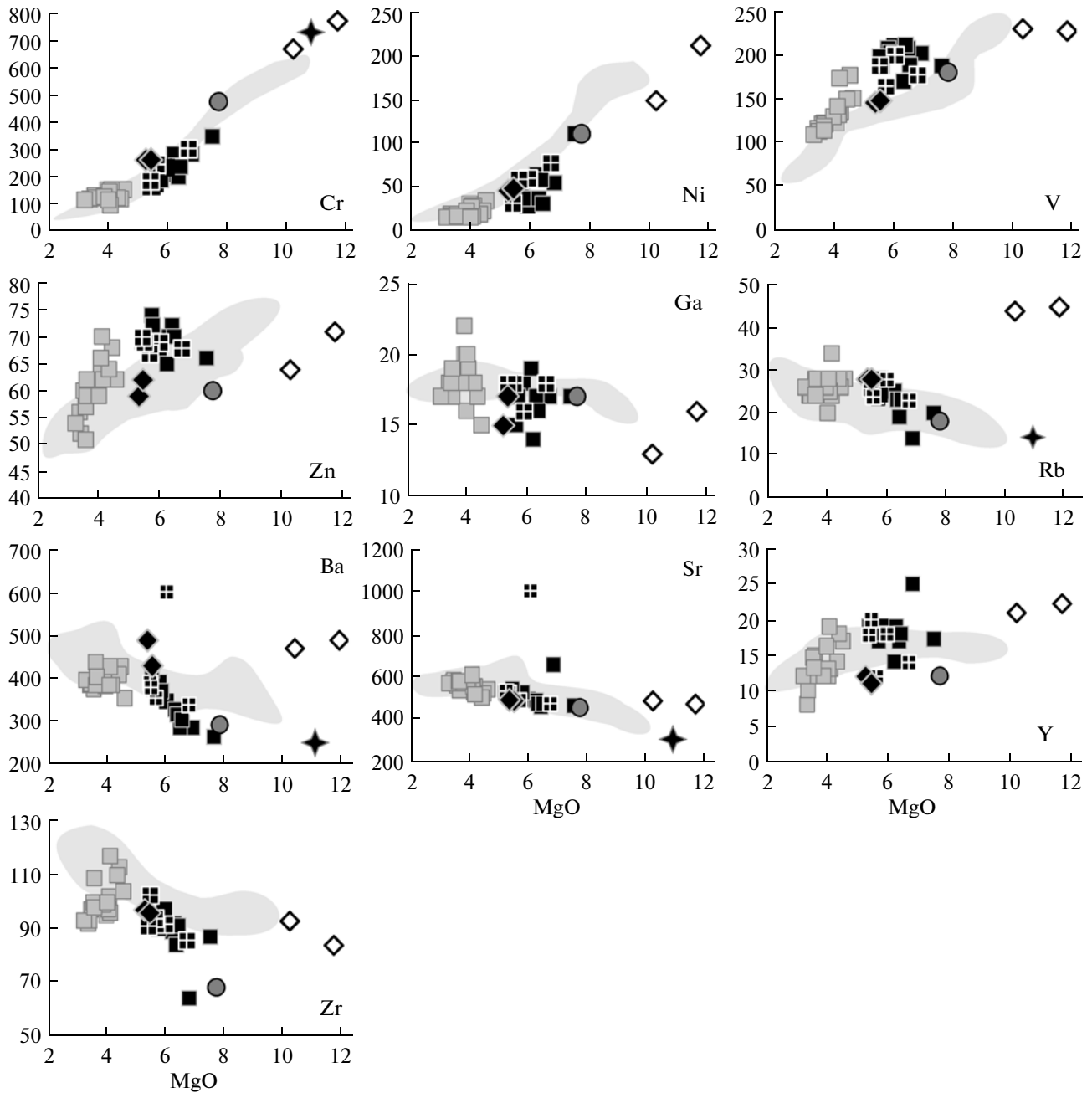


Рис. 15. Вариации содержаний редких элементов в породах вулкана Молодой Шивелуч относительно MgO. Условные обозначения см. на рис. 13.

фибола и неполной сепарации плагиоклаза из кристаллизующейся магмы способен объяснить монотонный рост Sr/Y в породах Молодого Шивелуча с увеличением SiO₂ без привлечения специфических моделей плавления субдущированной плиты под вулканом.

Роль смешения магм

Гибридное происхождение пород обычно устанавливается по присутствию меланократовых вклю-

чений, неравновесных минеральных парагенезисов, корродированных вкрапленников и значительных вариаций зональности фенокристаллов (например, Eichelberger, 1978, 1980). Прямым доказательством смешения является одновременное извержение магм разного состава в виде гетеротакситовых лав (Вольнец, 1979). На Камчатке признаки смешения различных по составу расплавов описаны для пород, изверженных в 1996 г. в кальдере Академии Наук (Гриб, 1997), для лав вулканов Кизимен (Мелекесцев и др., 1992; Трусов, Плечов, 2005; Churikova et al.,

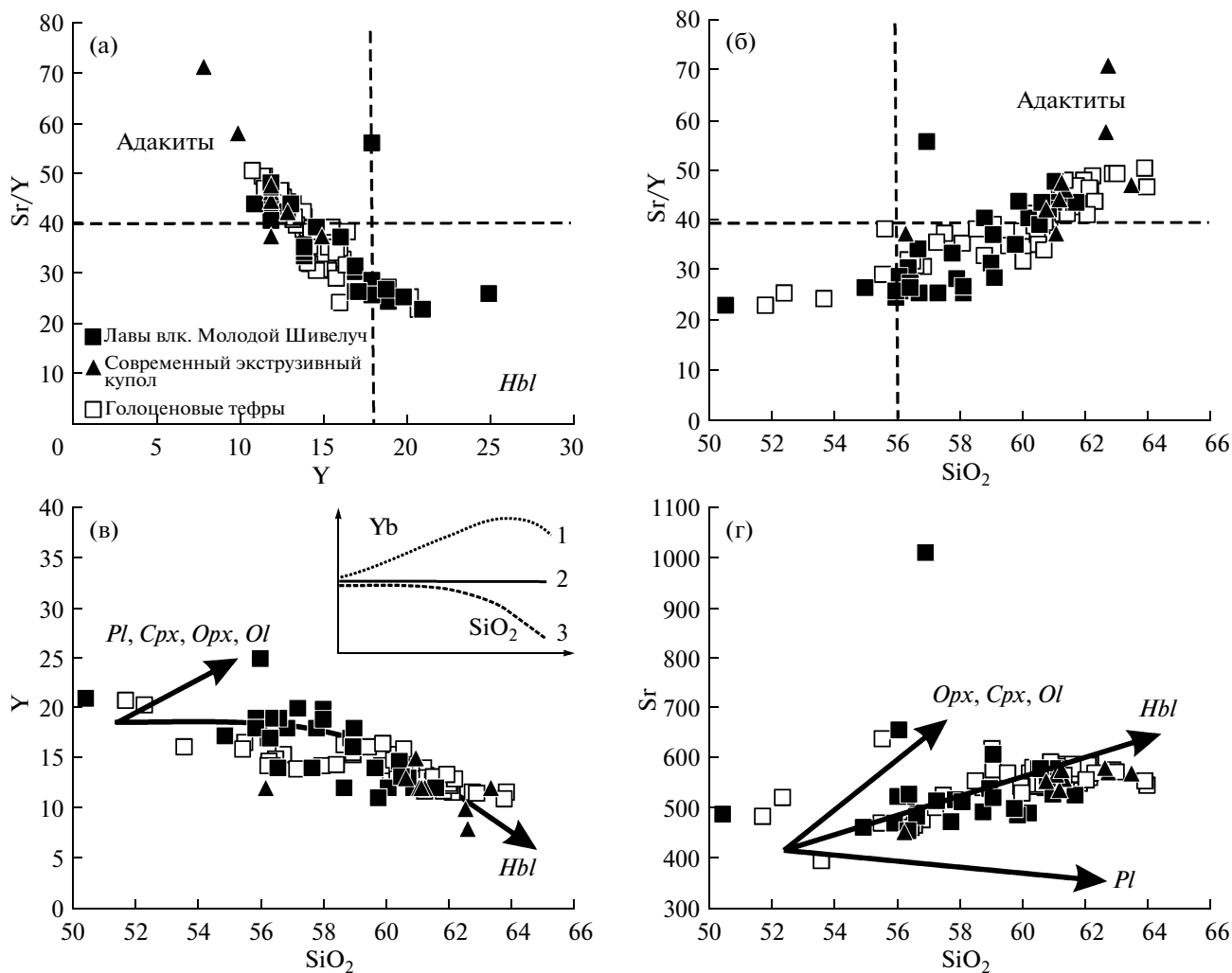


Рис. 16. Вариации содержаний SiO₂, Sr и Y в лавах и пирокластических породах вулкана Молодой Шивелуч. Составы лав по данным настоящей работы, составы пирокластике по данным (Ponomareva et al., 2007). Область адакитовых составов (Y < 18 г/т, Sr/Y > 40, SiO₂ > 56 мас. %) показана по данным (Defant, Drummond, 1990). На врезке к рисунку (в) показаны тренды изменения Yb (близкого геохимического аналога Y) при кристаллизации базальтового расплава без амфибола (1) и с амфиболом в условиях нижней коры (2) и верхней и средней коры (3) по данным (Worhny, 2008). Жирными стрелками на рисунках (в) и (г) показаны векторы направления изменения состава расплавов при кристаллизации различных фаз.

2007), Дикий Гребень (Биндеман, 1993), Малый Семейчик (Леонов, Гриб, 2004), Ааг и Арик (Федоров, 1972), Ксудач (Volynets et al., 1999).

В работе (Вольнец, 1979) указывалось на присутствие гетеротакситовых пемз в пирокластических отложениях Молодого Шивелуча. Признаки взаимодействия различных по составу расплавов были задокументированы для лав современных извержений вулкана (Humphreys et al., 2006; Dirksen et al., 2006; Gorbach, 2006). В настоящей работе показано, что смешение магм — широко распространенное явление на протяжении всей голоценовой истории вулкана. Об этом свидетельствуют находки гетеротакситовых лав, резкая и нередко обратная зональность минералов-вкрапленников и геохимические особенности пород.

В плагиоклазах Молодого Шивелуча прямая, обратная и осцилярная зональность часто имеет прерывистый характер с резкими скачками содержания анортитовой составляющей (рис. 5). Так, в лавах изверженных в 2004 г., вкрапленники плагиоклаза имеют дискретные по составу группы ядер от An₃₂ до An₈₃₋₇₈ (Горбач, 2006). Во вкрапленниках плагиоклазов с обратной зональностью на границе ядро-внешние зоны происходит резкое увеличение содержания анортитовой составляющей на 25–29 мол. %. Ядра имеют оплавленный и резорбированный облик. Плагиоклазы с пятнистыми ядрами An₈₃₋₇₈, обрастают незональным андезином An₄₇₋₄₉. Такие резкие изменения в составе зон едва ли отражают небольшое изменение давления в магматическом очаге в результате неравномерного расхода магмы

при извержении (Humphreys et al., 2006) либо повышение температуры в результате выделения скрытой теплоты кристаллизации (Blundy et al., 2006). На наш взгляд, столь резкая зональность должна возникать при действительно сильных изменениях физико-химических условий кристаллизации, возможных в результате взаимодействия магм контрастного состава и температуры.

Вероятно, что именно смешением контрастных магм обусловлены и широкие вариации содержания Al_2O_3 , наблюдаемые в кристаллах роговой обманки из *Hbl-Pl* андезитов (6–14 мас. %) (рис. 8). Высокие содержания глинозема отмечены в крайних зонах вкрапленников лав современного экструзивного купола (Горбач, 2006), в амфиболах гетеротакситовых лав и на контакте меланократового включения с вмещающим андезитом. К примеру, игольчатый амфибол во включении содержит 10–13 мас. % Al_2O_3 , тогда как роговая обманка из вмещающего андезита – 7–9 мас. %. На контакте лавы и включения развиваются зональные кристаллы с глиноземистой каймой. Такая позиция фенокристаллов свидетельствует об определяющем влиянии повышения температуры на формирование высокоглиноземистых кайм в амфиболах *Hbl-Pl* андезитов. Этот вывод в настоящей работе находит соответствие с экспериментальными данными (например, Scaillet, Evans, 1999), которые показывают рост содержания Al_2O_3 , Na_2O и TiO_2 в амфиболах при повышении температуры. Также следует отметить интенсивную опацификацию роговой обманки в породах Молодого Шивелуча с явными признаками смешения магм контрастного состава (*Ol-Px-Pl±Hbl* андезиты). Как показано в работе (Плечов и др., 2007), это может свидетельствовать о разложении кристаллов роговой обманки в результате повышения температуры при смешении дифференцированных и примитивных магм.

Смешение магм оказывало влияние на состав минералов и на более ранних стадиях кристаллизации. Как показано на рис. 11, фракционная кристаллизация оливина из базальтового расплава должна приводить к быстрому исчерпанию никеля из расплава и резкому понижению его концентрации в равновесном оливине. В случае смешения примитивного и дифференцированного расплавов гибридные магмы имеют более высокие содержания никеля при тех же значениях магнезиальности по сравнению с продуктами дифференциации базальтов. Оливины, кристаллизующиеся из таких гибридных магм, должны также характеризоваться повышенным содержанием никеля. Отклонение составов оливинов из *Ol-Px-Pl±Hbl* андезитов в область более высоких концентраций NiO при сходных значениях F_0 оливина по сравнению с оливинами из меланократового включения и *Ol-Cpx-Hbl±Phl* базальтов может объясняться гибридной природой этих пород, образованных в результате смешения примитивных базальтов и дифференцированных андезитов.

Наибольший геохимический эффект смешение магм оказывало на содержания Cr и Ni, концентрации которых особенно контрастны в примитивных и дифференцированных породах. На графике вариаций содержания Cr в породах относительно SiO_2 (рис. 17) предсказанный тренд фракционной кристаллизации базальтового расплава имеет строго нелинейную гиперболическую форму и приводит к резкому обеднению расплавов Cr (и Ni) на ранних этапах кристаллизации. Точки составов лав и пирокластики Молодого Шивелуча отклоняются от тренда кристаллизации и формируют рассеянные линейные тренды, свидетельствующие о происхождении этих магм в результате смешения примитивной базальтовой магмы и в различной степени дифференцированных андезитов. Именно с этим процессом следует связывать высокую магнезиальность, повышенные содержания Cr и Ni в андезитах Молодого Шивелуча, что является диагностическим признаком голоценовой тефры этого вулкана по сравнению с другими вулканами Камчатки (Ponomareva et al., 2007).

Процессы смешения примитивных и дифференцированных магм могут служить объяснением происхождения магнезиальных андезитов вулкана Молодой Шивелуч. Однако открытым остается вопрос – почему среди всех вулканов Камчатки магнезиальные андезиты характерны исключительно для вулкана Молодой Шивелуч, несмотря на широкое распространение процессов смешения магм во всех вулканических зонах (Волинец, 1979; Гриб, 1997; Мелекесцев, 1992; Трусов, Плечов, 2005; Churikova et al., 2007; Биндеман, 1993; Леонов, Гриб, 2004; Федоров, 1972; Volynets et al., 1999; Eichelberger, Izbekov, 2000)? Возможным объяснением этого феномена может быть существенное различие в составе наиболее примитивных магм между вулканами Центрально-Камчатской депрессии и Восточного вулканического фронта. Для вулкана Шивелуч, как и в целом для вулканов Центрально-Камчатской депрессии, примитивные базальты и андезибазальты, достигающие поверхности, характеризуются высокими значениями $Mg\# > 0.65$, $Ni > 100$ г/т, $Cr > 500$ г/т, близкими к составу вероятных мантийных магм (например, Portnyagin et al., 2007). Наиболее примитивные породы Восточного вулканического фронта имеют, как правило, дифференцированный высокоглиноземистый состав ($Mg\# < 0.6$, $Ni < 50$ г/т, $Cr < 150$ г/т) (Геохимическая типизация ..., 1990). Очевидно, что внедрению этих базальтов в верхние горизонты коры предшествовали этапы глубинной дифференциации, и их смешение с кислыми магмами не способно произвести расплавы, сопоставимые по составу с магнезиальными андезитами вулкана Молодой Шивелуч (рис. 17).

Вывод этой работы о гибридной природе магнезиальных андезитов Молодого Шивелуча не отрицает возможности участия андезитовых магм ман-

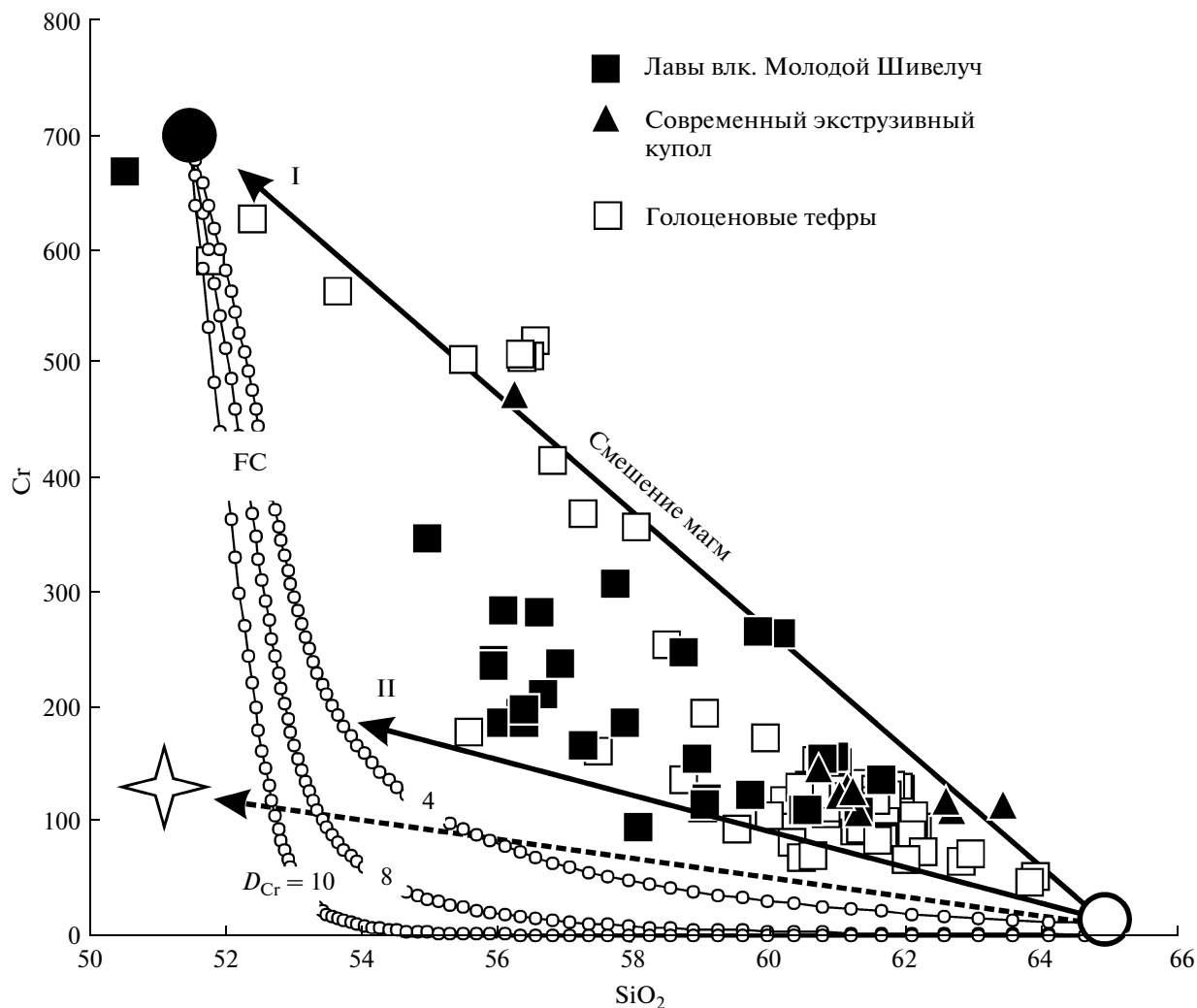


Рис. 17. Вариации содержаний SiO_2 и Cr в лавах и пирокластических породах вулкана Молодой Шивелуч.

Составы лав по данным настоящей работы, составы пирокластиков по данным (Ponomareva et al., 2007). Тонкими линиями с кружками показаны модельные тренды фракционной кристаллизации (FC) базальтового расплава с исходным содержанием Cr = 700 г/т и $\text{SiO}_2 = 51.5$ мас. % (залитый кружок) при различных значениях валового коэффициента распределения (D_{Cr}) между минералами и расплавом. Для расчета использована зависимость между содержанием SiO_2 и степенью кристаллизации по данным (Brophy, 2008). Жирными стрелками показаны возможные тренды смешения дифференцированной магмы с $\text{SiO}_2 = 65$ мас. % (незалитый кружок), примитивного базальта (I), андезибазальта, полученного в результате 35% кристаллизации примитивного расплава (II). Пунктирная стрелка показывает тренд смешения дифференцированного андезита и среднего состава высокоглиноземистого базальта умеренно-калиевой серии (звездочка) Восточного вулканического фронта (Геохимическая типизация..., 1990).

тийного происхождения в магматических процессах на Камчатке. Афировые, в отличие от андезитов Шивелуча, примитивные андезиты ($\text{SiO}_2 = 58.4$ мас. %, $\text{Mg\#} = 0.70$) были описаны в составе Шишейского вулканического комплекса (Portnyagin et al., 2007). Хотя участие магм подобного состава не может быть исключено при образовании серии пород Молодого Шивелуча, более вероятным предполагается базальт-андезибазальтовый состав исходных магм с содержанием $\text{SiO}_2 \leq 54$ мас. % (Portnyagin et al., 2007; Portnyagin, Manea, 2008).

Аномальное обогащение стронцием и барием, отмеченное для лав экструзии г. Каран, а также по-

вышенные содержания калия, фосфора, рубидия, бария и стронция в $Ol-Cpx-Hbl \pm Phl$ базальтах не могут быть объяснены процессами кристаллизационной дифференциации магм Молодого Шивелуча или процессами их смешения. Возможным объяснением аномального состава лав г. Каран может быть контаминация андезитовых магм породами коры, в частности алевритистыми мергелями, обнажающимися у северного склона экструзии (рис. 3б). Для объяснения обогащения примитивных $Ol-Cpx-Hbl \pm Phl$ базальтов рядом несовместимых микроэлементов в работе (Portnyagin et al., 2007) предполага-

Таблица 7. Представительные составы включений хромистой шпинели (мас. %) в оливинах лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч

Компо- ненты	Обр. 7482			Обр. 7487			Обр. 7516-1			Обр. 7499-4		
TiO ₂	0.60	0.96	0.73	0.48	0.60	0.52	0.41	0.54	0.42	0.45	0.45	0.27
Al ₂ O ₃	10.19	12.01	11.41	15.12	12.76	13.23	15.13	12.97	14.02	10.68	14.75	15.03
Cr ₂ O ₃	48.72	41.98	46.08	45.31	44.88	44.39	44.29	37.99	39.57	45.18	46.53	49.92
FeO	9.62	13.17	8.04	8.02	10.88	10.53	9.46	16.3	14.37	12.90	7.66	5.26
Fe ₂ O ₃	21.25	21.53	21.81	18.92	19.36	20.12	18.48	21.54	20.95	18.73	17.9	16.07
MnO	0.25	0.26	0.25	0.18	0.20	0.24	0.20	0.24	0.25	0.30	0.20	0.13
MgO	7.96	8.03	8.45	9.87	9.38	8.85	10.15	7.78	8.28	9.30	10.48	11.79
NiO	0.05	0.06	0.07	0.14	0.16	0.13	0.12	0.13	0.12	0.06	0.10	0.13
Сумма	98.66	98.07	97.84	98.1	98.27	98.07	98.32	97.58	98.05	97.66	98.13	98.68
Cr#	76.23	70.10	73.04	66.78	70.23	69.24	66.26	66.27	65.44	73.94	67.91	69.02
Mg#	34.52	32.27	36.55	42.79	38.92	37.2	42.69	29.86	32.62	37.77	45.57	52.89
Fo, мол. %	88.41	86.09	87.28	88.62	87.79	89.30	89.14	86.91	86.91	91.23	90.40	91.96

Примечание. Содержания Fe₂O₃ и FeO пересчитаны по стехиометрии, Cr# = 100 × Cr/(Cr + Al), Mg# = 100 × Mg/(Mg + Fe), Fo – состав вмещающего оливина.

ется участие метасоматизированной мантии в процессах магмогенерации.

Условия эволюции магм

Петрографические и минералогические особенности пород лавового комплекса Молодого Шивелуча отражают различные стадии фракционирования и гибридации магм. Характер вариаций петрогенных оксидов и элементов-примесей в породах свидетельствует о том, что в смешении участвуют магмы различной степени дифференциации. Полевые наблюдения подтверждают это предположение – потоки гетеротакситовых лав зафиксировали стадию неполного смешения *Ol-Crx-Pl* андезибазальта и *Hbl-Pl* андезита. Эти расплавы поступали на поверхность одновременно и, следовательно, одновременно сосуществовали в питающей системе вулкана. Для объяснения этого факта питающая магматическая система Молодого Шивелуча должна иметь вертикальную зональность по составу и температуре и может быть представлена либо одним крупным расщепленным очагом, либо камерами на разных уровнях глубинности, заполненными магмами разной степени дифференциации.

Данные по составу минералов предполагают более вероятным существование двух или нескольких магматических камер, расположенных на разных уровнях глубинности. Роговообманковые андезиты современных извержений кристаллизуются в условиях близповерхностной магматической камеры. Температура андезитов перед извержением в 2001 г. оценивается в ~840°C при летучести кислорода на 1.5–2.1 порядка выше буфера NNO (+2.1...+2.7

QFM) (Humphreys et al., 2006). Максимальное давление в ~1.6 кбар, рассчитанное для максимального содержания H₂O (5.1 мас. %) в расплавах включениях из *Hbl-Pl* андезитов, предполагает глубину магматической камеры 5–6 км ниже вершины вулкана (Humphreys et al., 2006). К сходным выводам пришли (Жаринов, Демянчук, 2008) на основе анализа данных по объему и расходу лав, формирующих современный экструзивный купол.

Минералогия оливин-клинопироксен-плагиоклазовых андезибазальтов и оливин-роговообманковых плагиоклазосодержащих андезитов предполагает более глубокий уровень их кристаллизации. На высокое давление при кристаллизации паргаситового амфибола *Ol-Hbl±Pl* андезитов указывает его ассоциация с магнезиальным оливином. В работе (Grove et al., 2003) показано, что такая ассоциация отвечает кристаллизации водонасыщенных базальтовых расплавов в условиях высокого давления. К примеру, паргаситовая роговая обманка лав вулкана Шаста, формирующая реакционные каймы вокруг магнезиального оливина и пироксена, соответствует амфиболу, полученному экспериментально из водонасыщенного магнезиального базальта при давлении 8 кбар (Grove et al., 2003). Согласно эмпирическому геобарометру (Anderson, Smith, 1995), давление при кристаллизации высокоглиноземистого (Al_{сум} = 2–2.6 форм. ед.) амфибола *Ol-Hbl±Pl* и *Ol-Px-Pl±Hbl* андезитов Молодого Шивелуча составляло ~7–9 кбар. Летучесть кислорода, рассчитанная по оливин-хромшпинелевому парагенезису (Ballhaus et al., 1991) для *Ol-Hbl±Pl* андезитов, на 2.1 ± 0.38 лог. ед. превышает буфер QFM. Для *Ol-Crx-Pl* андезибазальтов и *Ol-Px-Pl±Hbl* андезитов вели-

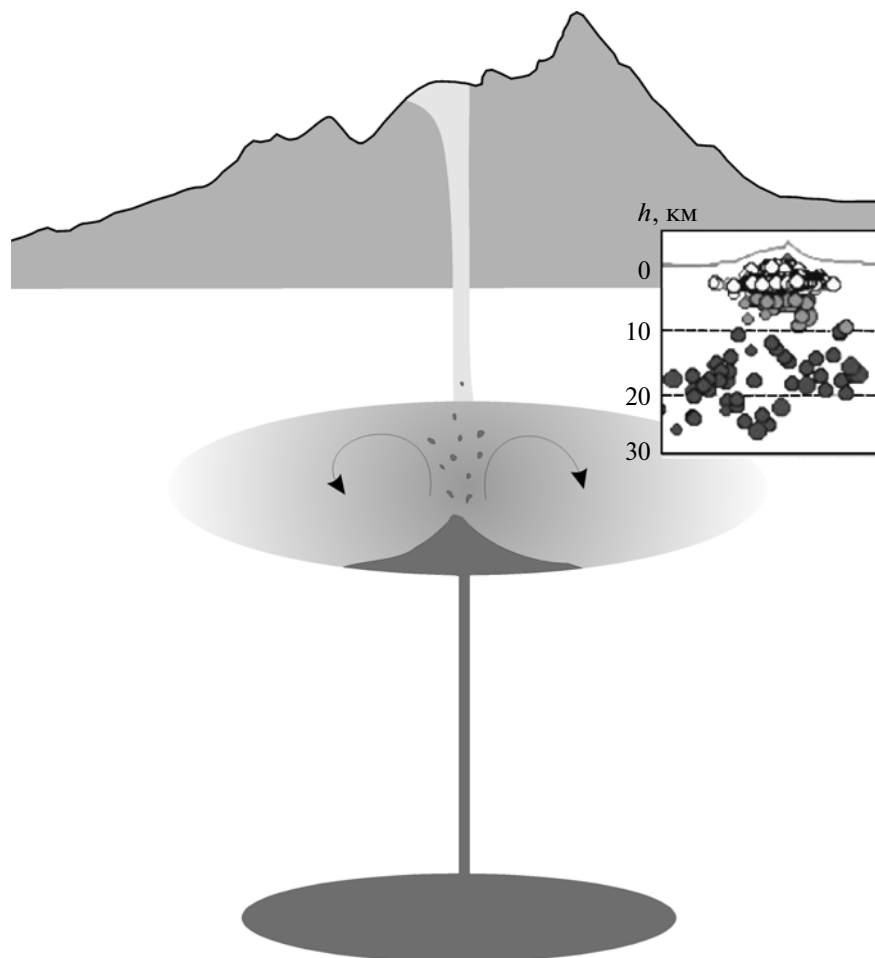


Рис. 18. Предполагаемая модель смешения расплавов различной степени дифференциации в питающей магматической системе вулкана Молодой Шивелуч. Пояснения в тексте.

На врезке показано распределение гипоцентров вулканических землетрясений в период с января 2000 г. по октябрь 2001 г., по данным КФ ГС РАН.

чина f_{O_2} несколько ниже и составляет $+1.8 \pm 0.15$ и $+1.7 \pm 0.27$ QFM соответственно. Температура андезибазальтовых лав перед извержением была близка к 1100°C , согласно графическому двухпироксеновому геотермометру (Lindsley, 1983).

Наиболее простая схема взаимодействия различных по составу магм в питающей системе вулкана показана на рис. 18. Согласно (Sparks et al., 1977), плотные и горячие базальтоидные магмы накапливаются в основании магматической камеры, заполненной взвесью ранее образованных кристаллов в дифференцированном матричном расплаве (crystal mush), вызывая разогрев и конвекцию в ее верхних горизонтах. При этом происходит дефрагментация основного расплава на глобулы и формирование меланократовых включений (Биндеман, 1993). В результате конвекции в главный объем магматической камеры могут вовлекаться и кумулятивные образования с ее стенок, которые обильны в экструзивных лавах.

Динамика и состав продуктов извержений вулкана в 2001–2009 гг. удовлетворительно соответствуют данной модели. Началу извержения в 2001 г. предшествовала интенсивная сейсмичность в нижней коре. На врезке к рис. 18 показано распределение гипоцентров землетрясений в период с января 2000 г. по октябрь 2001 г. (данные Камчатского филиала геофизической службы РАН). На глубинах ~ 12 – 22 км выделяется асейсмичная область, в пределах которой может располагаться промежуточный очаг. Экструзивные лавы, изверженные в 2001–2002 гг., в 2004 г. (Humphreys et al., 2006; Dirksen et al., 2006; Gorbach, 2006), в 2005 г. и в ходе текущего извержения (2006 г. по настоящее время), имеют признаки гибридного происхождения. Предположительное время инъекции более основной магмы в близповерхностную магматическую камеру оценивается в 60–360 дней перед извержением в 2001–2002 гг. (Dirksen et al., 2006). Варьирующий состав экструзивных лав, изверженных в 2004–2008 гг. (табл. 1, обр. 7433, 7452-1, 7452-7, 7515, 7515-1, 7555), может

свидетельствовать о проявлении конвекции в близ-поверхностной магматической камере.

Периодичность пополнения магматического очага

В голоценовом пирокластическом разрезе вулкана присутствует три горизонта, резко выделяющихся своим основным составом на фоне монотонного преобладания андезитов (Ponomareva et al., 2007). Это тефра умеренно-калиевых андезибазальтов 7600 ^{14}C лет, высококалиевых базальтов 3600 ^{14}C лет и предшествующее извержение андезибазальтов и лав контрастного состава 3700 ^{14}C лет. Сходство состава материала верхнего обломочного горизонта в т. 7533 на реке Сухой Ильчинец с породами наиболее ранних экструзий и лавовых потоков Молодого Шивелуча указывает на то, что первый эпизод поступления на поверхность лав более основного состава произошел ранее чем 10000 лет ^{14}C лет. Можно предположить, что в указанные периоды времени происходило пополнение близповерхностной магматической камеры под вулканом. Если это предположение верно, то в продуктах извержений промежуточных циклов можно было бы ожидать антидромную направленность изменения состава лав и пирокластике, отражающую увеличение степени фракционирования магм во времени. Однако составы пирокластических пород промежуточных извержений Молодого Шивелуча не показывают значимых вариаций и имеют монотонный состав — $\text{SiO}_2 = 60\text{--}62$ мас. % и $\text{Mg\#} = 58\text{--}60$ (Ponomareva et al., 2007). Только отдельные извержения обнаруживают присутствие более основных пород. К примеру, в пемзах, изверженных в 1964 г., фиксировались такситовые разности с составом полос и шпиров 60–62 и 56 мас. % SiO_2 (Иванов, 2008), а тефра извержения в 1854 г. имеет состав $\text{SiO}_2 = 55.6$ и 57.5 мас. % (Ponomareva et al., 2007). Такие временные вариации состава изверженных продуктов больше согласуются с небольшими и частыми инъекциями базальтоидных магм в нижние горизонты магматической камеры. Извержения возраста 3600–3700, 7600 и предшествующие ~10000 C^{14} лет, вероятно, связаны с более интенсивным поступлением глубинных магм в то время. Как показано (Волынец и др., 1997), извержения 3600 и 7600 C^{14} лет синхронны периодам регионального усиления вулканической деятельности на Камчатке.

ВЫВОДЫ

Проведено первое детальное геологическое и петролого-геохимическое изучение пород лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч. Полученные данные позволили сделать следующие основные выводы.

1. В составе лавового комплекса Молодого Шивелуча присутствуют экструзивные тела, лавовые потоки и дайки различного состава и возраста. Объем лавовых образований современной постройки

Молодого Шивелуча не превышает 25 км³. С учетом отложений обломочных лавин объем лав Молодого Шивелуча и экструзий группы Каран близок к 50 км³, что соответствует 1/3 от суммарного объема продуктов, изверженных вулканом в голоцене.

2. Лавы вулкана Молодой Шивелуч представлены преимущественно магнезиальными андезитами умеренно-калиевой известково-щелочной серии и образуются в результате фракционной кристаллизации примитивного расплава и смешения с кислыми дифференциатами. Деятельность Молодого Шивелуча связана с периодическими внедрениями примитивных магм в близповерхностную магматическую камеру, заполненную взвесью ранее образованных кристаллов и остаточным расплавом.

3. Геологическими свидетельствами процессов смешения являются лавы с гетеротакситовой структурой и присутствие меланократовых включений в лавах современного экструзивного купола. К минералогическим признакам относятся дискретные по составу группы ядер фенокристаллов плагиоклаза и роговой обманки и их резкая зональность, присутствие высокомагнезиального оливина во всех разностях пород и его реакционные взаимоотношения с пироксенами и роговой обманкой, обратная зональность пироксенов.

4. “Адакитовые” геохимические характеристики ($\text{Sr/Y} > 50$, $\text{Y} < 18$ г/т) андезитов вулкана Молодой Шивелуч наиболее выражены в самых дифференцированных разностях пород и возникают в результате фракционной кристаллизации ассоциации плагиоклаза и роговой обманки при неполном отделении кристаллов плагиоклаза от фракционирующих магм.

Благодарности. Авторы признательны Т.М. Философовой (ИВиС ДВО РАН), Д. Рау и М. Тёнер (IFM-GEOMAR) за помощь в проведении аналитических исследований, М.М. Певзнер (ГИН РАН) за определение возраста, В.В. Пономаревой, И.В. Мелексцеву (ИВиС ДВО РАН) и А.А. Бабанскому (ИГЕМ РАН) за ценные замечания в ходе обсуждения исследования и выводов. Особая благодарность за помощь в осуществлении полевых работ альпинистке Раисе Сагитовой и сотрудникам Лаборатории активного вулканизма и динамики извержений ИВиС ДВО РАН С. Самойленко и Т. Маневич.

Полевые исследования выполнены при поддержке грантов ДВО РАН № 06-III-B-08-369 и № 07-III-D-08-094. Аналитические исследования выполнены в рамках российско-германского проекта КАЛЬМАР (подпроект “Пространственная и временная эволюция вулканизма и магматизма в области Алеутско-Камчатского сочленения”) финансируемого министерством Науки и Образования ФРГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биндеман И.Н.* Ретроградная везикуляция базальтовой магмы в малоглубинных очагах: модель происхождения меланократовых включений в кислых и средних породах // *Петрология*. 1993. Т. 6. № 2. С. 632–644.
- Вольнец О.Н.* Гетеротакситовые лавы и пемзы // *Проблемы глубинного магматизма*. М.: Наука, 1979. С. 181–196.
- Вольнец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д.* Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // *Петрология*. 1997. Т. 5. № 2. С. 206–221.
- Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки // *Тр. Института геологии и геофизики СО АН СССР*, Новосибирск. Ред. Кривенко А.П. 1990. Вып. 390. 259 с.
- Горбач Н.В.* Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 2. С. 9–16.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // *Вулканы и извержения*. М.: Наука, 1969. С. 3–38.
- Гриб Е.Н.* Петрология продуктов извержения 2–3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 5. С. 71–97.
- Двигало В.Н.* Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. по фотограмметрическим данным // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 2. С. 104–109.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим данным и видеосъемке // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 4. С. 3–14.
- Иванов Б.В.* Андезиты Камчатки (Справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов). М.: Наука. 2008. 364 с.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 186 с.
- Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч // *Действующие вулканы Камчатки*. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84–103.
- Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Вольнец О.Н.* Вулкан Кизимен (Камчатка) — будущий Сент-Хеленс? // *Вулканология и сейсмология*. 1992. № 4. С. 3–32.
- Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др.* 300 лет жизни камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII–XX вв.). Часть I. 1650–1964 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 5. С. 3–19.
- Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др.* 300 лет жизни камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII–XX вв.). Часть II. 1965–2000 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 1. С. 3–20.
- Меняйлов А.А.* Вулкан Шивелуч — его геологическое строение, состав и извержения // *Тр. Лаб. вулканологии АН СССР*. 1955. Вып. 9. 264 с.
- Плечов П.Ю.* Роговые обманки в андезитах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный и условия их опацизации // *Петрология*. 2007. Т. 15. № 6. С. 639–655.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. и др.* Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты Курило-Камчатского региона // *Петрология*. 2003. Т. 11. № 5. С. 451–470.
- Трусов С.В., Плечов П.Ю.* Образование антидромной серии вулкана Кизимен (Камчатка) // *Международное петрографическое совещание “Петрография XXI века”*, 20–22 июня 2005 г., г. Апатиты. 2005. С. 48–51.
- Федоров М.В.* О неоднородности магматического расплава вулканов Ааг-Арик // *Бюллетень Вулканологических станций*. 1972. № 48. С. 48–50.
- Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в мае–июле 2001 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2001. № 6. С. 1–13.
- Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.И.* Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 3. С. 46–68.
- Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1995. № 1. С. 3–20.
- Anderson J.L., Smith D.R.* The effects of temperature and f_{O_2} on the Al-in-hornblende barometer // *American Mineralogist*. 1995. V. 80. P. 549–559.
- Arai S.* Compositional variation of olivine-cromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotite // *Journal of Volcanology and Geothermal Reserchers*. 1994. V. 114. P. 279–293.
- Ballhaus C., Berry R., Green D.* High-pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991. V. 107. P. 27–40.
- Blundy J., Cashman K., Humphreys M.* Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes // *Nature*. 2006. V. 443 P. 76–80.
- Brophy J.G.* A study of rare earth element (REE) — SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different processes // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. V. 156. P. 337–357.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G.* Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *Journal of Petrology*. 2001. V. 42. P. 567–593.
- Churikova T., Wörner G., Eichelberger J., Ivanov B.* Minor- and trace element zoning in plagioclase from Kizimen Volcano, Kamchatka: insights on the magma chamber processes // *Volcanism and Tectonics of the Kamchatka Peninsula and Adjacent Arcs*. Eds. Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. *Geophysical Monograph Series*. 2007. V. 172. P. 303–324.
- Defant M.J., Drummond M.S.* Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*. 1990. V. 347. P. 662–665.
- Dirksen O., Humphreys M.C.S., Pletchov P. et al.* The 2001–2004 dome-forming eruption of Shiveluch Volcano, Kamchatka: observation, petrological investigation and numerical modelling // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. № 155. P. 201–226.
- Eichelberger J.C.* Andesitic volcanism and crustal evolution // *Nature*. 1978. V. 275. P. 21–27.

- Eichelberger J.C.* Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs // *Nature*. 1980. V. 288. P. 446–450.
- Eichelberger J.C., Izbekov P.E.* Eruption of andesite triggered by dike injection: contrasting cases at Karymsky volcano, Kamchatka and Mount Katmai, Alaska // *Philosophical Transactions – Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2000. V. 358. № 1770. P. 1465–1485.
- Gorbach N.V.* New lava of Shiveluch volcano: en evidense of magma mingling? // 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan–Kurile–Kamchatka–Aleutian Arcs (JKASP-5), Japan, July 9–14, 2006. P. 133–137.
- Grove T.L., Elkins-Tanton L.T., Parman S.W. et al.* Fractional crystallisation and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2003. № 145. P. 515–533.
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J.* Magma Evolution and Open-System Processes at Shiveluch Volcano: Insights from Phenocryst Zoning // *Journal of Petrology*. 2006. V. 47. № 12. P. 2303–2334.
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J.* Shallow-level decompression crystallisation and deep magma supply at Shiveluch Volcano // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. V. 155. № 1. P. 45–61.
- Jarosevich E.J., Nelen J.A., Norberg J.A.* Reference sample for electron microprobe analysis // *Geostandards Newsletter*. 1980. V. 4. P. 43–47.
- Lindsley D.H.* Pyroxene thermometry // *American Mineralogist*. 1983. V. 68. P. 477–493.
- Moyen J-F.* Yigh Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the “adakitic signature” // *Lithos*. 2009. V. 112. P. 556–574.
- Münker C., Wörner G., Yogodzinski G.M., Churikova T.* Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka–Aleutian arc lavas // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. № 224. P. 275–293.
- Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestsev L.V.* Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Volcanology*. 1998. № 59. P. 490–505.
- Ponomareva V.V., Kyle P., Pevzner M.M. et al.* Holocene Eruptive History of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka region*. Eds. Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Lees J. AGU Geophysical Monograph. 2007. V. 172. P. 263–282.
- Portnyagin M.V., Bindeman I.N., Hoernle K., Hauff F.* Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: magma genesis at the edge of the Pacific Plate // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka region*. Eds. Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Lees J. AGU Geophysical Monograph. 2007. V. 173. P. 203–244.
- Portnyagin M.V., Manea V.C.* Mantle temperature control on composition of arc magmas along the Central Kamchatka Depression // *Geology*. 2008. V. 36. P. 519–522.
- Richards J.R., Kerrich R.* Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Economic Geology. Special Paper*. 2007. V. 102. № 4. P. 537–576.
- Scaillet B., Evans B.W.* The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption $P-T-f_{O_2}-f_{H_2O}$ conditions of the dacite magma // *Journal of Petrology*. 1999. V. 40. P. 381–411.
- Sparks R.S.J., Sigurdsson H., Wilson L.* Magma mixing—mechanism for triggering acid explosive eruptions // *Nature*. 1977. V. 267. P. 315–318.
- Stern C.R., Kilian R.* Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. V. 123. P. 263–281
- Streck M.J., Leeman W.P., Chesley J.* High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt // *Geology*. 2007. V. 35. P. 351–354.
- Volynets O.N.* Geochemical Types, Petrology, and Genesis of Late Cenozoic Volcanic Rocks from the Kurile–Kamchatka Island–arc System // *International Geology Review*. 1994. V. 36. P. 373–405.
- Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A. et al.* Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1999. V. 91. P. 23–42.
- Yogodzinski G.M., Kay R.W., Volynets O.N. et al.* Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge // *GSA Bulletin*. 1995. V. 107. № 5. P. 505–519.
- Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G. et al.* Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*. 2001. V. 409. P. 500–504.

Фондовая литература:

Лопатин В.Б., Литвинов А.Ф., Цикунов А.Г. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые площади листов О-57-XXV, XXXVI (Отчет о геологической съемке и поисках полезных ископаемых м-ба 1 : 200000, проведенных Шивелучской партией в 1976–78 гг.) В 3-х томах. 1979.