

## Научные статьи

УДК 551.217.24

### СОСТАВ ТЕФРЫ СОВРЕМЕННЫХ (2009-2011 гг.) ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

© 2012 В.В. Пономарева<sup>1</sup>, М.В. Портнягин<sup>2,3</sup>, Д.В. Мельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: [ponomareva@kscnet.ru](mailto:ponomareva@kscnet.ru)

<sup>2</sup>GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Киль, Германия

<sup>3</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва, 119991

В работе рассматриваются новые данные о составе тефры пяти современных (2009-2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов, полученные с помощью методов электронной микроскопии и высокоточного электронно-зондового микроанализа. Все изученные пеплы содержат свежее вулканическое стекло. В тефре вулканов Ключевской и Пик Сарычева, а также в тефре вулкана Кизимен, изверженной в январе 2011 г., преобладает ювенильный материал. В тефре начальных извержений вулкана Кизимен (декабрь 2010 г.) и извержений вулканов Шивелуч и Корякский преобладает резургентный материал, а ювенильный материал имеет подчиненное значение. Большинство проанализированных вулканических стекол имеют нормальную щелочность и умеренно-калиевый состав в соответствии с преобладающим типом магм на Камчатке. Составы стекол извержений 2010 г. вулканов Ключевской и Шивелуч соответствуют ожидаемым для данного этапа их развития. Изученные стекла извержения 2010-2011 гг. вулкана Кизимен имеют состав, идентичный продуктам его крупных доисторических извержений, что свидетельствует о наличии под вулканом магматического очага стабильного риолитового состава на протяжении по крайней мере последних 10 тыс. лет

*Ключевые слова:* современные эксплозивные извержения, тефра, вулканическое стекло, электронно-зондовый микроанализ.

#### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к эксплозивным вулканическим извержениям определяется во многом тем, что с ними связана наибольшая вулканическая опасность. Из всех вулканических явлений пеплопад — это наиболее частое событие, а вулканический пепел (тефра) — пожалуй, главное и самое масштабное вулканическое «орудие поражения». Вблизи вулкана мощный слой тефры погребает растительность и может существенно изменять ландшафт. Облако, нагруженное пеплом, может переноситься на тысячи километров от места извержения. Площадь, на которую может повлиять крупный пеплопад, на порядки превышает площадь зоны воздействия других вулканических процессов. Твердые частицы тефры могут

захватывать (адсорбировать) летучие соединения серы и различных галогенов и металлов, которые затем могут выпадать с дождем и осаждаться в почвах и поверхностных водах, что приводит к загрязнению пастбищ и водоемов.

Петрологическое и геохимическое изучение пеплов современных извержений может дать ценную информацию о состоянии питающей системы вулкана и ее изменениях, обусловивших извержения. Изучение образцов пеплов, отобранных в течение извержения, позволяет проследить синэруптивные изменения в магматическом очаге и оценить длительность петрологических процессов (Портнягин и др., 2011; Portnyagin et al., 2011a). Мониторинг минерального и химического состава пеплов в ходе извержения наряду с геофизическими

методами позволяет дать оперативный прогноз развития событий.

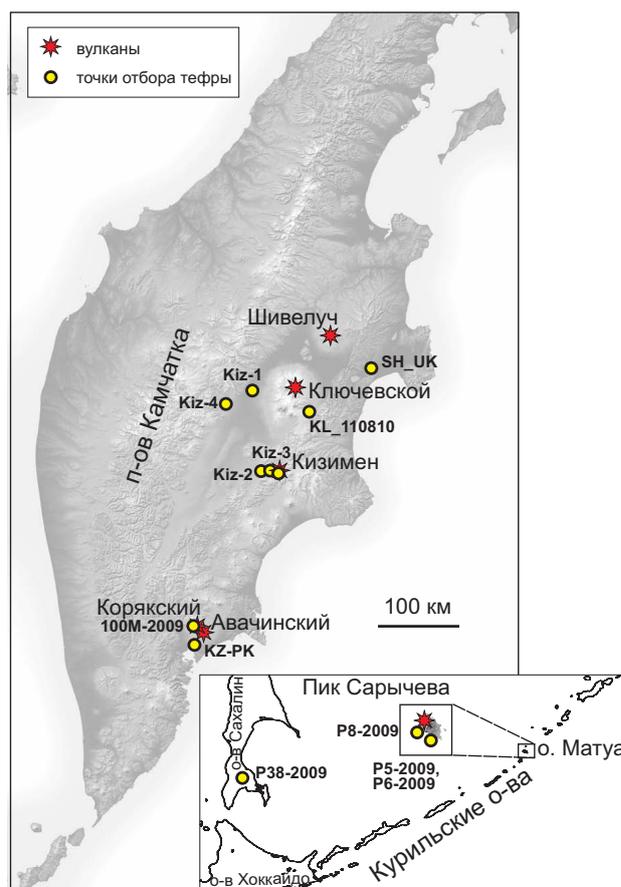
Последние годы (2009-2011) характеризовались повышенной активностью вулканов Камчатки и Курильских островов. В течение этих лет происходили извержения крайне активных вулканов Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Карымский. Кроме того, после длительного (несколько десятилетий) периода покоя на Камчатке активизировались вулканы Кизимен и Корякский, а на Курильских островах – вулкан Пик Сарычева (о. Матуа). Большинство извержений характеризовались взрывным характером и сопровождалось выбросом большого количества вулканического пепла. Пепловые тучи этих извержений распространялись на расстояния до двух тысяч километров, достигали побережья Северной Америки и были причиной отмены или изменений маршрутов многочисленных межконтинентальных авиарейсов (Гирина и др., 2011a; Webley et al., 2012; Williams et al., 2010). Неоднократные выпадения пепла наблюдались в городах и поселках Камчатки, на Курильских островах, на о. Сахалин и в Хабаровском крае.

Тефра сильных доисторических извержений вулканов Камчатки и Курильских островов является предметом детального изучения на протяжении последних тридцати лет (Базанова и др., 2005; Брайцева и др., 1979, 1998; Волинец и др., 1997; Braitseva et al., 1996, 1997). В последние годы начались исследования тефры доисторических извержений с применением высокоточных современных методов анализа (Dirksen et al., 2011; Kyle et al., 2011; Ponomareva et al., 2004, 2007, 2011; Portnyagin et al., 2011b). В рамках российско-германского проекта KALMAR <http://kalmar.ifm-geomar.de/> за последние четыре года было получено более 15000 анализов вулканических стекол из пирокластических пород Камчатки и Курильских островов, а также из пепловых горизонтов в морских отложениях северо-западной части Тихого океана, Берингова и Охотского морей. Пеплы слабых и умеренных современных извержений реже становились предметом детального изучения и не сравнивались с пеплами прошлых извержений вулканов-источников.

В данной работе мы излагаем результаты изучения тефры некоторых извержений 2009-2011 гг. с помощью методов электронной микроскопии и высокоточного электронно-зондового микроанализа. Полученные данные использованы для установления природы этих извержений и для определения положения составов стекол из тефры современных извержений в общей систематике составов стекол вулканов Камчатки и Курильских островов. Это первая попытка систематического исследования такого рода для тефры современных извержений вулканов Камчатки.

Вещественный и минеральный состав изучался в образцах пеплов различной размерности для извержений 2009-2011 гг. четырех вулканов Камчатки (Шивелуч, Ключевской, Кизимен, Корякский) и вулкана Пик Сарычева на о. Матуа, входящем в состав Курильской островной дуги. Места отбора образцов представлены на рис. 1. Общая характеристика всех образцов и координаты точек отбора приведены в табл. 1.

До анализа образцы промывались дистиллированной водой и монтировались в препараты из эпоксидной смолы (Buehler EpoThin). Препараты полировались на алмазных пастах и непосредственно перед анализом покрывались углеродной нанопленкой. Изображения образцов были получены в режиме регистрации отраженных электронов на электронном микроскопе JEOL JXA 8200 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 20 нА. Полный архив полученных изображений находится в электронном приложении, которое размещено по адресу [http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem\\_eruptions.rar](http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem_eruptions.rar).



**Рис. 1.** Вулканы-источники и точки отбора тефры извержений 2009-2011 гг., изученной в рамках настоящей работы. Подписаны номера образцов, приведенные в табл. 1.

## СОСТАВ ТЕФРЫ

Таблица 1. Образцы тефры современных (2009-2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов

Образец	Вулкан	Время отбора	Координаты точки отбора (с.ш., в.д.)	Размерность	Коллектор
SH-UK	Шивелуч	март 2011	56.2822°, 162.1720°	От тонкого пепла до тонкозернистого песка	Т.К. Пинегина
KL_110810	Ключевской	11 августа 2011	55.7873°, 160.8849°	Тонкозернистый песок	В.В. Пономарева
Kiz-1	Кизимен	13 декабря 2010	56.0416°, 159.8608°	От тонко- до крупнозернистого песка	А.А. Овсянников
Kiz-2	Кизимен	2 января 2011	55.1158°, 159.9590°	От тонко- до крупнозернистого песка	Е.С. Власов
KZ-PK	Кизимен	2 января 2011	53.0921°, 158.6550°	Тонкий пепел	Т.К. Пинегина
Kiz-3	Кизимен	7 января 2011	55.1362°, 160.0960°	От тонко- до крупнозернистого песка	Е.С. Власов
Kiz-4 (96-0)	Кизимен	13 января 2011	55.9156°, 159.2836°	От тонко- до крупнозернистого песка	А.А. Овсянников
Kiz-5	Кизимен	2011	55.1001°, 160.2882°	Лапилли	А.А. Овсянников
100M-2009	Корякский	2009	53.3242°, 158.6436°	От очень тонкого пепла до тонкозернистого песка	И.В. Мелекесцев
P5-2009	Пик Сарычева	июнь 2009	48.0575°, 153.2021°	Тонкий пепел	А.В. Рыбин
P6-2009	Пик Сарычева	июнь 2009	48.0575°, 153.2021°	Тонкий пепел	А.В. Рыбин
P8-2009	Пик Сарычева	июнь 2009	48.0739°, 153.1683°	Фрагмент породы	А.В. Рыбин
P38-2009	Пик Сарычева	июнь 2009	47.0539°, 142.7249°	Очень тонкий пепел	А.В. Рыбин

Содержания главных элементов, серы и хлора в вулканических стеклах анализировались на электронном микросонде JEOL JXA 8200. Данный прибор оборудован пятью спектрометрами с дисперсией по длинам волн характеристического рентгеновского излучения, включая спектрометры повышенной чувствительности N-типа для высокоточного анализа микроэлементов. Анализ проводился расфокусированным до 5 мкм электронным пучком при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе 6 нА. Для калибровки прибора и мониторинга качества анализов использовались природные аттестованные образцы вулканических стекол и минералов (Jarosevich et al., 1981; Mosbah et al., 1991). Условия анализа каждого элемента и использовавшийся стандарт представлены в электронном приложении [http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem\\_eruptions.rar](http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem_eruptions.rar) (табл. 1). Результаты анализа корректировались по программе CITZAF (Armb, 1995).

Каждая аналитическая сессия, включавшая от 15 до 40 часов работы прибора в автономном режиме по предварительно намеченным координатам точек измерения, сопровождалась анализами основных стандартов (риолита, базальта и скаполита) в начале, через каждые 50-60 анализов

и в конце сессии. На основании этих измерений рассчитывались поправочные коэффициенты для каждой аналитической сессии, учитывающие возможность небольшого сдвига калибровки за продолжительное время анализа (электронное приложение [http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem\\_eruptions.rar](http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem_eruptions.rar), табл. 2). В большинстве случаев величина коэффициентов не превышала величины стандартной ошибки измерений стандартов. После введения поправки к измеренным данным, все анализы стекол приводились к сумме оксидов элементов 100% и использовались для построения представленных в данной работе графиков и геохимического анализа.

На этапе первичной обработки часть анализов была исключена на основании низких первичных сумм окислов (менее 95 мас.%), которые являются следствием неровной поверхности образца, случайного попадания луча в пустоты (поры) или в эпоксидную матрицу. Последнее идентифицировалось также по необычно высоким измеренным содержаниям хлора, коррелирующим с низкой суммой анализа, вследствие содержания до 3-4 мас.% хлора в использованной нами эпоксидной смоле Buehler EpoThin. В результате первичной обработки также выявлялись анализы, сделанные со случайным

захватом минеральных фаз, обычно микролитов плагиоклаза, пироксена или магнетита, что выявлялось по избыточным, неэквивалентным содержаниям  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  или  $FeO$ , соответственно, по сравнению с преобладающим составом стекол в образце.

Как показали результаты международного межлабораторного сравнения точности аналитических исследований вулканического стекла, выполненного по инициативе тефрохронологов группы INTAV (Международная группа по тефрохронологии и вулканизму по эгидой INQUA – Международного союза четвертичных исследований), принятая нами методика анализа стекол оказалась весьма успешной и позволила проанализировать образцы стекол с высокой точностью (Kuehn et al., 2011).

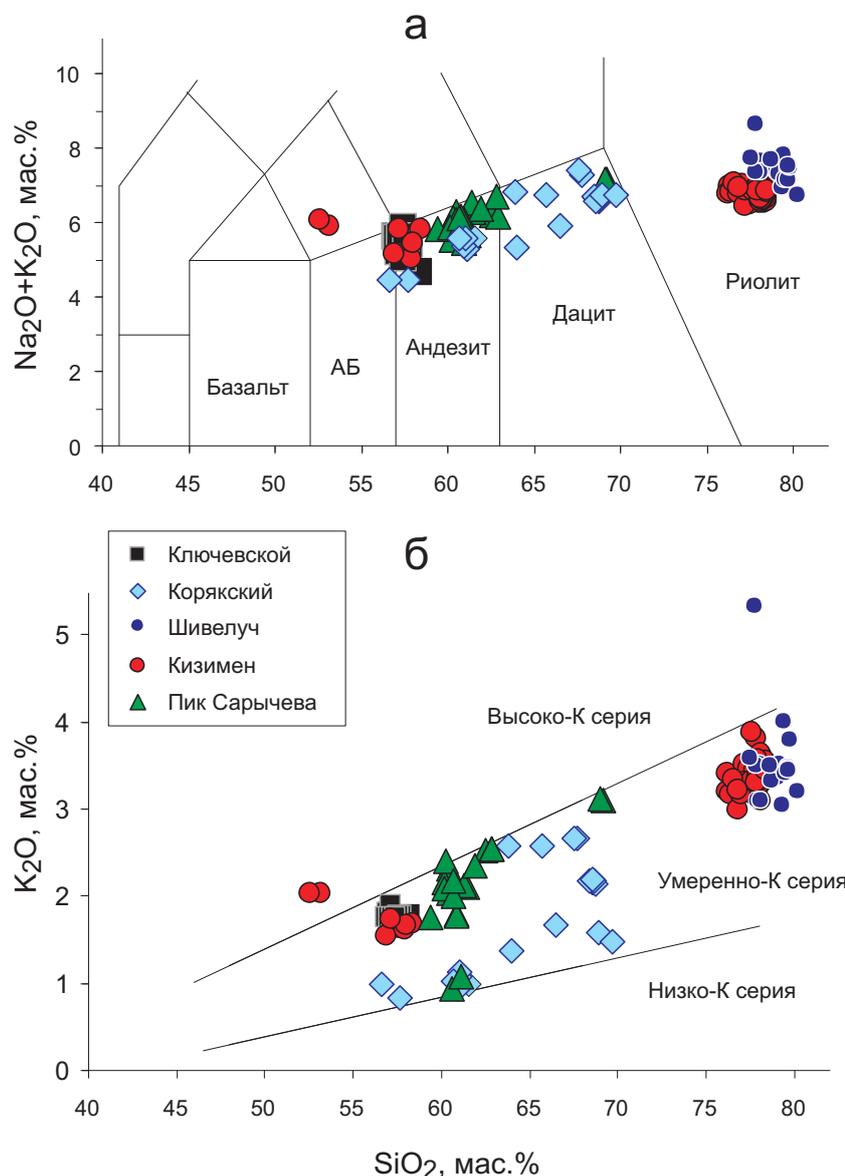
Аналогичная методика применялась нами ранее для получения около 11000 анализов вулканических стекол из пирокластических пород

Камчатки (база данных российско-германского проекта КАЛЬМАР). Эти данные были использованы для определения положения составов стекол из тефры современных извержений в общей систематике составов стекол вулканов Камчатки.

Всего было получено 180 анализов тринадцати элементов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, F, S, Cl) в стеклах из одиннадцати образцов тефры вулканов Шивелуч, Ключевской, Кизимен, Корякский и Пик Сарычева, извергавшихся в 2009-2011 гг. Все полученные нами данные находятся в электронном приложении (табл. 3) и показаны на диаграммах рис. 2 и 3.

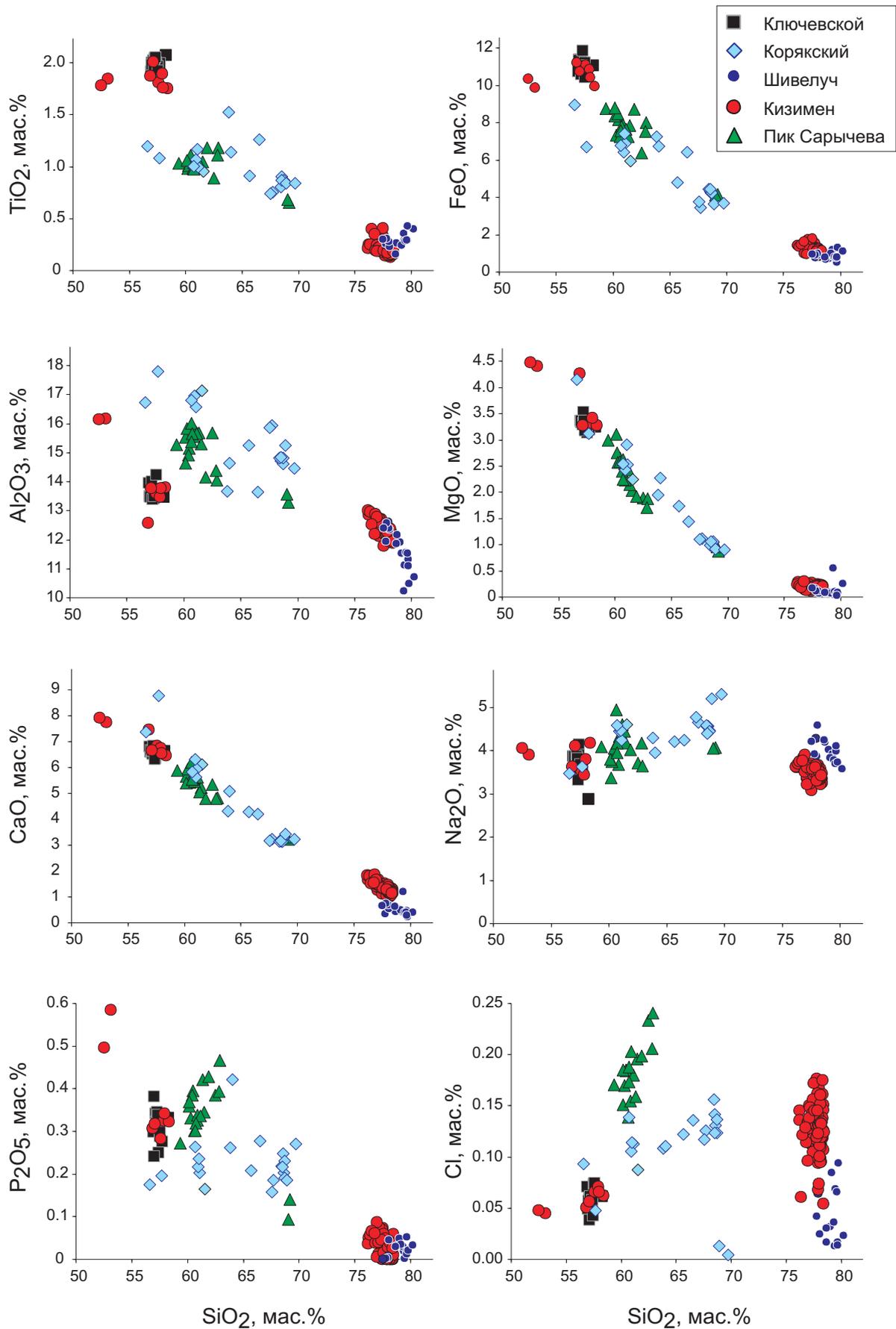
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вулканические пеплы принято разделять на две основные группы: магматические и гидровулканические (или фреатические) (Heiken, 1974; Heiken, Wohletz, 1985). В отечественной



**Рис. 2.** Классификационные геохимические диаграммы для вулканических стекол из тефры современных извержений вулканов Камчатки и Курильских островов. Содержания  $SiO_2$  и суммы  $Na_2O+K_2O$  в стеклах из тефры извержений в 2009-2011 гг. (а). Линиями разграничены поля составов магм (Le Bas et al., 1986). Подписаны поля магм нормальной щелочности, к которым относится большинство проанализированных составов стекол. АБ – андезибазальт. Содержания  $SiO_2$  и  $K_2O$  в стеклах извержений 2009-2011 гг. (б). Линиями разграничены поля составов низко-, умеренно- и высококальциевой серий магм островных дуг (Gill, 1981).

## СОСТАВ ТЕФРЫ



**Рис. 3.** Содержания главных и некоторых микроэлементов в стеклах из тефры извержений Камчатки и Курильских островов в 2009-2011 гг.

литературе пеплы первой группы обычно называют ювенильными, а второй – резургентными. Ювенильные частицы образуются в результате фрагментации магмы во время извержения и закалки образовавшихся фрагментов при контакте с воздухом. Такие частицы обычно представлены пористыми пемзовыми или шлаковыми фрагментами с «рваными» краями или же фрагментами тонких стекловатых перегородок, которые разделяли газовые пузырьки в магме (Heiken, 1974). Типичные резургентные пеплы содержат фрагменты твердых горных пород, раздробленных во время извержения. Такие фрагменты практически не содержат пор и имеют блоковую форму. В большинстве пеплов содержатся как ювенильные, так и резургентные частицы. Для установления природы эксплозивного извержения важно, какой именно тип частиц в его пепле преобладает.

Состав закалочных стекол отвечает последним по времени расплавам, существовавшим в магматической камере до или во время извержения, и может выступать в качестве простого, но чувствительного критерия изменений состава магм во времени. Полученные нами составы стекол современных извержений широко варьируют от относительно низкокремнистых андезибазальтов до высококремнистых риолитов (рис. 2). За исключением двух анализов одного из фрагментов стекол в образце тефры вулкана Кизимен, отобранного 13 декабря 2010 г., относящегося к группе трахиандезибазальтов, все остальные составы имеют нормальную щелочность. Наиболее кремнекислый состав имеют стекла вулканов Кизимен и Шивелуч, относящиеся к риолитам.

Вулкан **Шивелуч** (рис. 1) является одним из самых активных вулканов Камчатки. Его средний расход магмы ~ 0.015 км<sup>3</sup> в год, что на порядок превышает типичные значения для островодужных вулканов (Мелекесцев и др., 1991; Davidson, DeSilva, 2000). Вследствие своих частых извержений Шивелуч представляет угрозу не только для населенных пунктов Ключи и Усть-Камчатск, расположенных на расстоянии 45-85 км от вулкана, но и для напряженного авиационного движения между Северной Америкой и юго-восточной Азией (Neal et al., 2009). Эруптивная активность вулкана Шивелуч в течение голоцена характеризовалась плинианскими извержениями, чередующимися с периодами роста куполов и периодами покоя (Ponomareva et al., 2007). В период 2009-2011 гг. вулкан Шивелуч находился в стадии практически постоянной активности, связанной с ростом лавового купола. По данным визуального и инструментального мониторинга, проводимого Лабораторией исследований сейсмической и вулканической актив-

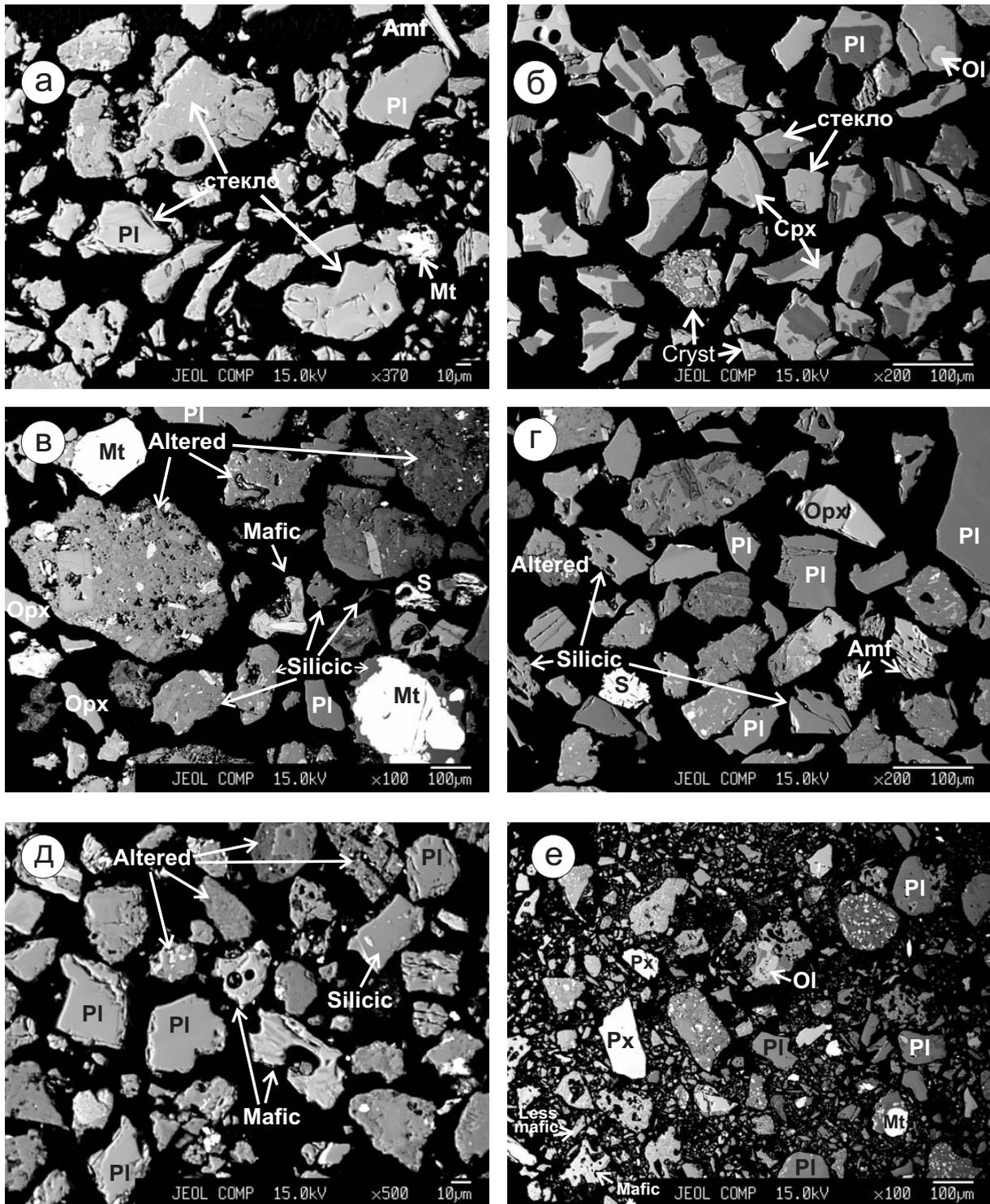
ности Камчатского филиала (КФ) Геофизической службы (ГС) РАН и группы KVERT Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, практически постоянно наблюдался сход раскаленных лавин с растущего купола, с частотой несколько раз в месяц происходили пепловые выбросы на высоту до 8 км и с частотой 0.5-3 раза в месяц – пепловые выбросы на высоту более 8 км. В целом, извержения 2009-2011 гг. можно отнести к слабым и умеренным. Объем изверженной пирокластики не превышал 0.001 км<sup>3</sup>, дальность разноса пеплов – 100 км (Гирина и др., 2011а, 2011б; Овсянников, Маневич, 2010).

Самое сильное извержение вулкана в течение описываемого периода началось в ночь с 27 на 28 октября 2010 г. В 00:06 (местное время) 28 октября было отмечено первое значительное сейсмическое событие, при котором, возможно, происходили выбросы пепла на высоту до 6 км. С 02:00 до 08:00 регистрировались серии сейсмических событий с амплитудой 41.7 мкм/с. Вероятно, в это время высота выбросов пепла достигала 8 км (Гирина и др., 2011а, 2011б; Овсянников, Маневич, 2010). Анализ данных аэрофотосъемки позволил установить, что во время извержения произошло крупное обрушение активного экструзивного купола (Двигало и др., 2011). Пепел выпал в юго-восточном направлении от вулкана и достиг пос. Усть-Камчатск. В это время в районе уже имелся устойчивый снежный покров.

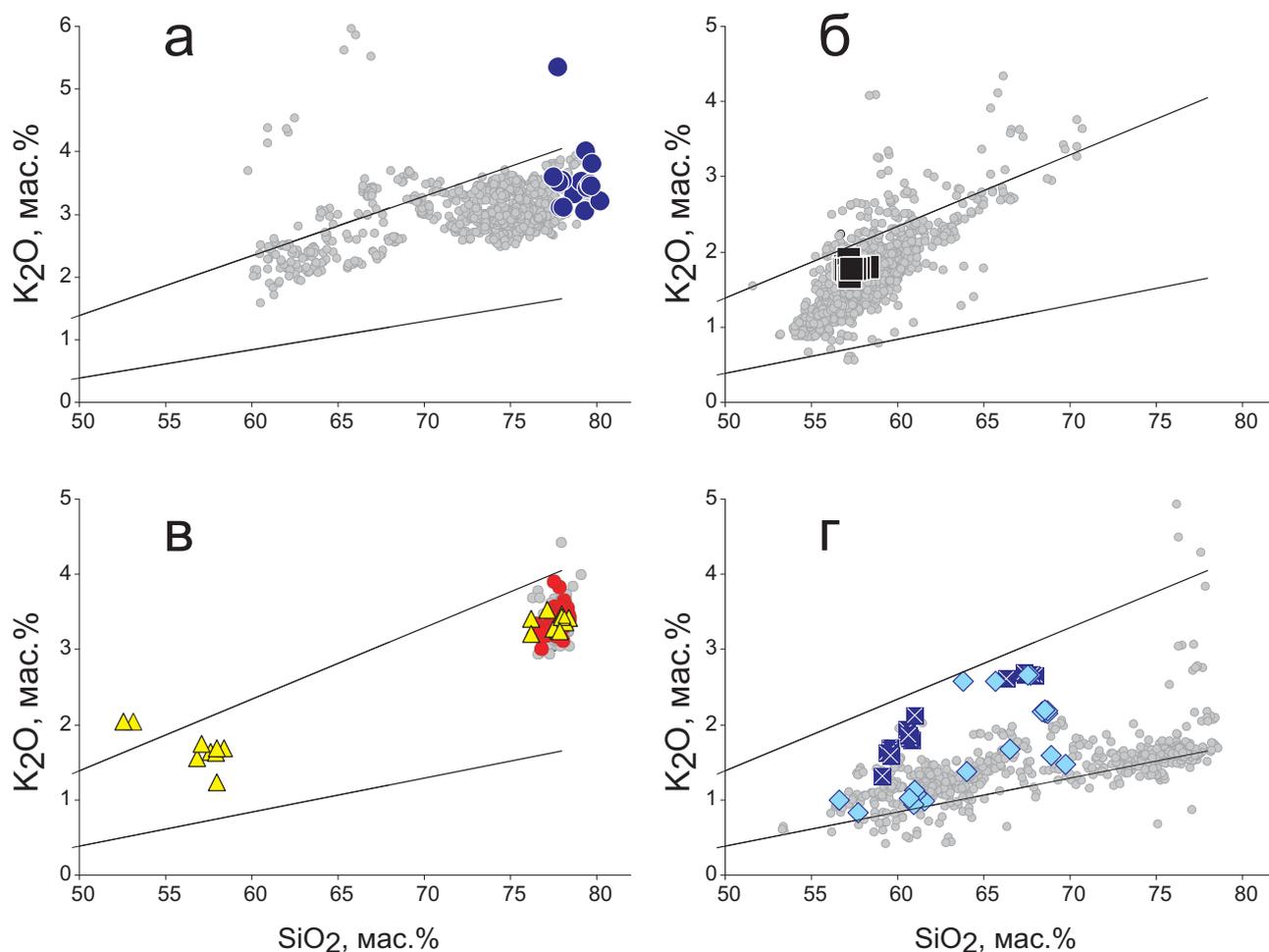
Нами изучен образец тонкого пепла SH-UK, который был отобран в 66 км юго-восточнее вулкана через пять месяцев после извержения из слоя пепла, захороненного в толще снега. Образец имеет типичный для тефры Шивелуча облик и представлен частицами размером до 50 микрон с редкими более крупными частицами – до 200 микрон (рис. 4а). Среди частиц преобладают мономинеральные зерна плагиоклаза, амфибола, пироксена, а также фрагменты сильно раскрытых и гидротермально измененных пород. Кроме того, в пепле имеется небольшое количество ювенильных стекловатых фрагментов. Стекло обычно слабопористое, слабо варьирующее по составу, с микролитами плагиоклаза, магнетита, ильменита.

Стекла из тефры извержения 2010 г. относятся к группе умеренно-калиевых, как и большинство ранее проанализированных стекол из пирокластики вулкана Шивелуч (Ponomareva et al., 2011) (рис. 2б, 5а). Одно из стекол 2010 г. имеет высококалиевый состав. Обращает на себя внимание высококремнистый состав стекол 2010 г., сопоставимый с составом наиболее кремнистых стекол, проанализированных ранее (рис. 5а), но нетипичный для стекол крупных пемзовых извержений вулкана. Также следует отметить

## СОСТАВ ТЕФРЫ



**Рис. 4.** Изображения образцов пеплов некоторых современных извержений, полученные на электронном микроскопе в режиме регистрации отраженных электронов: *a* – пепел в. Шивелуч (образец SH-UK); фото сделано с первичного образца без предварительного отмучивания тонкой фракции; *б* – пепел в. Ключевской (образец KL\_110810); *в* – пепел, собранный со снега в пос. Козыревск 13 декабря 2010 года в первые дни извержения в. Кизимен (обр. Kiz-1); *г* – пепел в. Кизимен, собранный 2 января 2011 года на кордоне Ипуин (обр. Kiz-2); *д* – пепел, собранный со снежника летом 2009 г. в завершающую стадию извержения в. Корякский (обр. 100M-2009). Среди обломков преобладают гидротермально-измененные породы (специально не отмечены); *е* – пепел вулкана Пик Сарычева, отобранный на о. Матуа (обр. P5-2009). Вулканическое стекло: Silicic – богато Si, Mafic – бедное Si, Less mafic – стекло основного состава, несколько более насыщенное Si, чем частицы, помеченные Mafic. Amf – амфибол, Mt – магнетит, Pl – плагиоклаз, Px – пироксен, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Ol – оливин, Cryst – раскристаллизованные фрагменты, Altered – раскристаллизованные гидротермально-измененные фрагменты, S – вторичный сульфид.



**Рис. 5.** Содержания  $\text{SiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в стеклах из пеплов современных извержений вулканов Камчатки в сравнении с данными о составе стекол из тефры извержений тех же вулканов в течение последних ~10 тыс. лет: *а* – тефра извержения в. Шивелуч 2010 года (темные кружки), тефра голоценовых извержений в. Шивелуч (серые кружки); *б* – тефра извержения в. Ключевской 2010 года (черные квадраты), тефра голоценовых извержений в. Ключевской (серые кружки); *в* – тефра вулкана Кизимен. Данные для текущего извержения показаны крупными темными кружками (образцы 2-13 января, 77 анализов), для образца Kiz-1, отобранного 13 декабря 2010 г. – треугольниками. Составы стекол голоценовой тефры в. Кизимен показаны серыми кружками (125 анализов); *г* – данные для стекол из образца 100М-2009, собранного со снежника на подножии в Корякский (ромбы), и тефры извержения в. Корякский 7600 л.н. (темные квадраты). Для сравнения показаны составы стекол голоценовых извержений соседнего Авачинского вулкана (серые кружки).

относительно низкохлористый состав стекол 2010 года (рис. 3), что указывает на значительную дегазацию магм до извержения.

На основании данных химического анализа и наблюдений во время извержения вулкана Шивелуч мы делаем вывод, что большая часть извергнутого в 2010 г. материала представляет собой фрагменты растущего экструзивного купола вулкана или же магматический материал, находившийся на малых глубинах в течение времени, достаточного для значительного фракционирования магм в область высококремнистых составов и их дегазации. Движущей силой этого извержения мог быть газ, скопившийся в результате дегазации магм либо поступавший в близповерхностный магматический резервуар из более глубоких частей питающей системы вулкана.

Вулкан **Ключевской** (рис. 1) – самый активный, мощный и крупный вулкан на Камчатке и один из наиболее продуктивных вулканов мира (Мелекесцев, 1980; Поляк, Мелекесцев, 1981). Извержения вулкана носят как эффузивный, так и эксплозивный характер, и связаны как с вершинным кратером, так и с вновь образованными жерлами (воронками взрыва, бокками, шлаковыми конусами) на склонах вулкана. По объему вынесенных на поверхность продуктов (в среднем  $\leq 0.1 \text{ км}^3$ ) большинство извержений вулкана можно отнести к слабым и умеренным, но они происходят практически постоянно, что и обеспечивает свежий облик постройки стратовулкана (Мелекесцев, 1980).

Нами изучен тонкий пепел, собранный в юго-восточной части Ключевской группы вул-

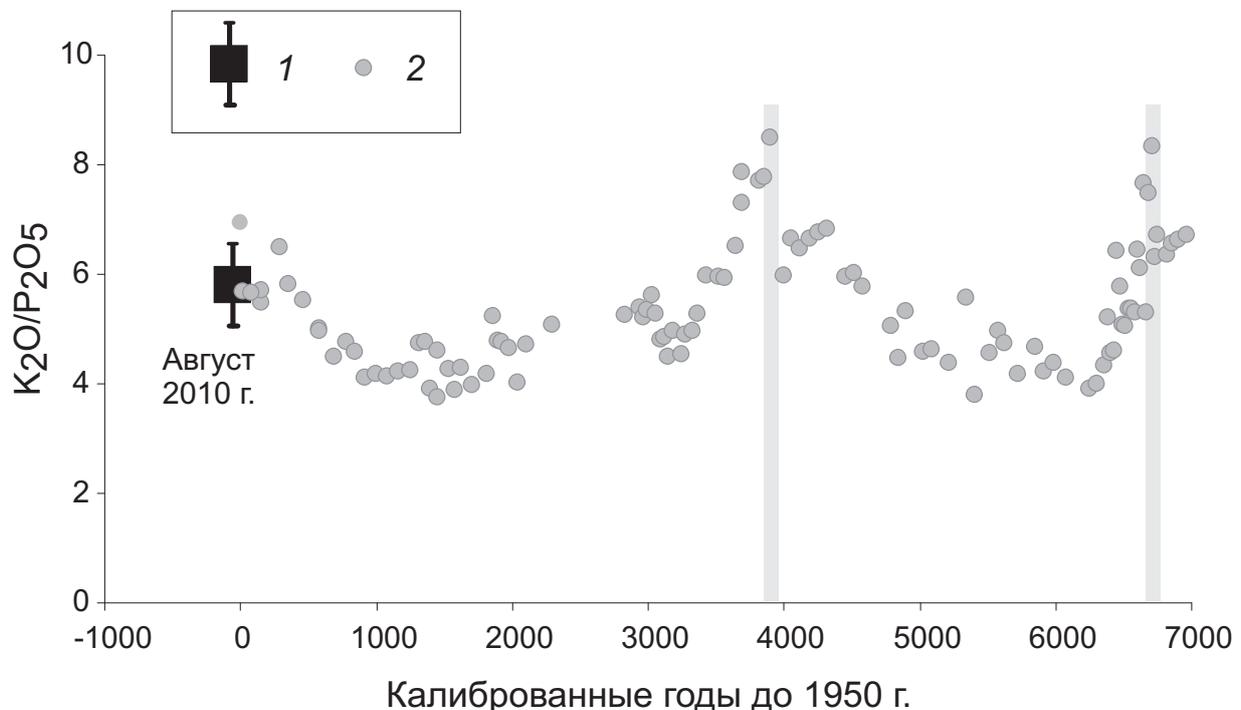
канов с полога палатки утром 11 августа 2010 г. Образец (табл. 1, KL\_110810) представлен преимущественно ювенильными частицами шлака размером до 100 микрон (рис. 4б), сложенными слабопористым стеклом с хорошо ограненными и слабозональными субфенокристами плагиоклаза и клинопироксена. Изредка встречаются выделения оливина неправильной амебообразной формы. Около 20% частиц представлено резургентными фрагментами раскристаллизованной породы вышеописанного минерального состава без признаков вторичных изменений.

Стекла в тефре извержения вулкана Ключевской 2010 года имеют андезитовый состав, типичный для стекол из тефры этого вулкана, но несколько отклоняющийся в область более калиевых составов по сравнению с преобладающим составом этих стекол (рис. 5б). Тем не менее, следует отметить, что состав стекол тефры 2010 г. находится в полном соответствии с эволюцией составов магм Ключевского вулкана за последние 7 тыс. лет (Portnyagin et al., 2011b). Как показано на рис. 6, тренд изменения состава стекол за последние 1000 лет направлен в сторону увеличения отношения  $K_2O/P_2O_5$ , а составы стекол 2010 года с  $K_2O/P_2O_5=6$  находятся на продолжении этого тренда. В настоящий момент составы магм Ключевского не достигли максимальных значений  $K_2O/P_2O_5=8$ , зафиксированных около 4000 и 7000 лет назад в периоды резкого усиления активности вулкана (Portnyagin et

al., 2011b). Судя по наклону тренда на рис. 6, этот момент наступит приблизительно через 300 лет, и тогда от Ключевского вулкана, по-видимому, можно ожидать более крупных извержений.

Вулкан **Кизимен** (рис. 1) до декабря 2010 г. проявлял лишь фумарольную активность. Единственное зафиксированное историческое извержение произошло в декабре 1928 г. – январе 1929 г., когда на вершине вулкана ночью наблюдался огонь, а черный «дым» выходил из того места, где расположены современные фумаролы (Влодавец, Пийп, 1957). Отложений этого извержения на подножии вулкана обнаружено не было (Мелекесцев и др., 1992). Текущее извержение вулкана Кизимен, начавшееся в 2010 г., – первое для этого вулкана событие подобного масштаба на памяти человека.

Нами изучались несколько образцов тефры, собранных в период с 13 декабря 2010 г. по 13 января 2011 г. Образцы отбирались со снега после видимых пеплопадов (Малик, Овсянников, 2011). Образец тефры первого сильного пеплопада, собранный 13 декабря 2010 г. в пос. Козыревск, представлен песком от тонко- до крупнозернистого (рис. 4в). Частицы очень гетерогенны по составу. Среди них отмечены крупные (до 2 мм) фрагменты зерен минералов (плагиоклаз, ортопироксен, амфибол, магнетит) с оторочкой стекла или раскристаллизованной основной массы, фрагменты умеренно раскристаллизованных пород, пемза, фрагменты сильно



**Рис. 6.** Вариации отношения  $K_2O/P_2O_5$  в стеклах из тефры в Ключевской в течение последних семи тысяч лет: 1 – средний состав стекол извержения в августе 2010 года; 2 – средние составы голоценовой тефры. Пики активности в Ключевской в голоцене показаны серыми вертикальными линиями.

измененных пород с вторичной, судя по морфологическим признакам, сульфидной минерализацией, а также – в относительно небольшом количестве – фрагменты стекол различного состава. Составы стекол варьируют от базальтов до риолитов при общем преобладании кислых стекол. Мафические и промежуточные по составу стекла содержат микролиты пироксенов и плагиоклаза с нормальной зональностью. Облик высококремнистых стекловатых частиц варьирует от гомогенного умеренно пузырчатого до более массивного с микролитами плагиоклаза, пироксенов и рудных минералов.

Образцы, собранные в январе 2011 г., представлены одним образцом лапилли, тремя образцами вулканического песка (рис. 4з) и одним образцом очень тонкого пепла, отобранном в г. Петропавловске-Камчатском на расстоянии ~ 250 км от вулкана (рис. 1). Во всех этих образцах присутствуют различные типы частиц (см. электронное приложение [http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem\\_eruptions.rar](http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem_eruptions.rar)), однако пропорция чужеродного материала существенно меньше, чем в образцах извержения в декабре 2010 г. за счет большего количества кислых стекол близкого состава. Несколько более кислые стекла наблюдаются в частично раскристаллизованных фрагментах. Минералы представлены крупными (до 2 мм) кристаллами плагиоклаза, ортопироксена, роговой обманки и магнетита. Для плагиоклаза характерна блоковая зональность по содержанию анортита, а для ортопироксена – незональные ядра и обратная зональность по магнезиальности с края зерен. Характерно присутствие обильных первичных и вторичных сульфидов. Первые обычно включены в магнетит, реже – в другие минералы. Вторичные сульфиды отмечены с краев частиц гидротермально-измененных фрагментов пород. Состав сульфидов был качественно проанализирован методом EDS (энергодисперсионный анализ) и отвечает пирротиту. Частицы пепла вулкана Кизимен, выпавшие в г. Петропавловске-Камчатском, очень сходны по морфологии с таковыми из других январских образцов, но гораздо мельче: их размер не превышает 100 микрон (см. фотографии в электронном приложении).

Для текущего извержения вулкана Кизимен было проанализировано шесть образцов, отобранных в период с 13 декабря 2010 по 13 января 2011 г. (рис. 2 и 3). Судя по данным микрозондового анализа, в самом раннем пепле, отобранном в Козыревске (Kiz-1), присутствуют стекла двух групп: стекла первой группы по составу соответствуют андезитам нормальной щелочности (преобладают) и трахиандезитбазальтам (одна проанализированная частица), а второй – рио-

литам (рис. 5в). Во всех пеплах январской фазы извержения стекла имеют устойчивый риолитовый состав.

При детальном рассмотрении данных становится очевидным, что составы мафических стекол из самого раннего образца (Kiz-1, пос. Козыревск) по всем главным и редким компонентам практически идентичны стеклам вулкана Ключевского из обр. KL\_110810 (рис. 3). Поскольку образец KL\_110810 отбирался во время извержения вулкана Ключевского, причем эруптивная туча была направлена на район отбора, принадлежность этой тefры именно Ключевскому не вызывает сомнения. Тefра вулкана Кизимен отбиралась со снега некоторое время спустя после извержения вулкана Кизимен. Поэтому нельзя исключить, что этот пепел на самом деле представляет собой смесь тefры вулкана Кизимен, выпавшей в декабре, и тefры вулкана Ключевского, отложенной во время сильных пеплопадов в ноябре 2011 г. По данным КФ ГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), в ноябре на вулкане Ключевском неоднократно отмечались сейсмические события и вулканическое дрожание, а в те дни, когда вулкан был открыт, были видны пепловые и парогазовые шлейфы.

Риолитовые стекла из пеплов текущего извержения вулкана Кизимен, отобранных в декабре 2010 – январе 2011 г., практически неотличимы от стекол в тefре голоценовых извержений этого вулкана. Эти стекла имеют гомогенный умеренно-калиевый риолитовый состав, который не менялся во времени. Стекла текущего и более ранних извержений вулкана Кизимен практически не содержат микролитов, кристаллизовавшихся перед извержением во время движения магм к поверхности, и, следовательно, могут отражать состав расплава в магматическом очаге под вулканом (рис. 5в). В этом случае, постоянство составов стекол в тefре вулкана Кизимен можно интерпретировать как свидетельство наличия стабильного по составу риолитового очага под вулканом, который был источником как крупных доисторических, так и текущего извержения. Этот вывод существенно меняет ранее высказанные предположения о постепенном опустошении очага кислой магмы под вулканом и замещении его мафическим материалом (Мелекесцев и др., 1992) и скорее поддерживает заключение работы (Churikova et al., 2007) о независимом существовании очагов кислого и основного составов, материал которых может смешиваться перед извержениями или в их процессе.

Вулкан **Корякский** относится к крупнейшим вулканическим сооружениям на Камчатке и вместе с вулканом Авачинским находится в непосредственной близости к наиболее насе-

ленной территории Камчатки. Исторические извержения вулкана Корякский отмечались 22 декабря 1926 г. и в 1956–1957 гг. (Горшков, 1958; Гущенко, 1959; Маренина и др., 1962; Мелекесцев, 1996; Новограбленов, 1926; Сиринов, Тимербаева, 1959). Они были слабыми и имели фреатический характер. Извержение 2008–2009 гг. можно считать типичным для текущего периода активности вулкана Корякский. Максимальное проявление вулканической активности наблюдалось в период с конца декабря 2008 по июнь 2009 г. По данным группы KVERT <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index.php> Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, первый протяженный парогазовый шлейф длиной около 200 км с небольшим содержанием пепла был зафиксирован 23 декабря 2008 г. на спутниковых снимках NOAA и был направлен на северо-восток от вулкана (Гирина и др., 2010). В последующее время можно было визуально наблюдать протяженные аэрозольные шлейфы с небольшим содержанием пепла, которые, судя по спутниковым данным (информация группы KVERT ИВиС ДВО РАН и Аляскинской вулканологической обсерватории), протягивались на первые сотни километров в разные (по направлению ветра) стороны от Корякского вулкана. К середине мая 2009 г. активность вулкана Корякского заметно ослабла, однако пепло-газовые шлейфы продолжали регистрироваться на спутниковых снимках вплоть до конца сентября 2009 г. (Гирина и др., 2010).

Нами был изучен образец тонкого пепла 100М-2009, собранный из снежника на расстоянии менее 4 км от жерла летом 2009 г. (в завершающую стадию извержения). Образец, таким образом, представляет собой материал, выпавший не из одного, а из многих пепловых шлейфов вулкана. Размер частиц в пепле не превышает 100 мкм, а большинство частиц имеет размер <5 мкм. В пепле преобладают измененные (гидротермально переработанные?) фрагменты пород, составляющие не менее 70%. Фрагменты кристаллов плагиоклаза также обильны и составляют не менее 20% (рис. 4д). По этим признакам пепел можно было бы оценить как продукт чисто фреатического извержения, если бы не наличие в нем небольшого количества (<10%) частиц ювенильного слабопористого шлака. Судя по различному оттенку стекол в частицах шлака (рис. 4д), они довольно сильно варьируют по содержанию  $\text{SiO}_2$ . В стеклах содержатся микролиты плагиоклаза и пироксена.

Корякский вулкан имел не так много эксплозивных извержений за последние 10 тыс. лет (Базанова, Сулержицкий, 2009), поэтому в нашей базе данных имеется только один образец тефры этого вулкана с возрастом 7600 лет. Как показано на рис. 5г, стекла в тефре 2008–2009 гг. варьи-

руют от андезитовых ( $\text{SiO}_2=56$  мас.%) до дацитовых ( $\text{SiO}_2=70$  мас.%) и имеют составы, близкие умеренно-К стеклам соседнего Авачинского вулкана. Только несколько анализов стекол более калиевого дацитового состава перекрываются по составу со стеклами извержения Корякского вулкана 7600 л.н. Интерпретация этих данных неоднозначна. Неполное соответствие ранее известным стеклам Корякского вулкана может указывать на недостаточно представительную выборку составов для сравнения или на возможную контаминацию тефры извержения 2009 г. ранее отложенной тефрой Авачинского вулкана. Если же проанализированные составы стекол действительно отвечают современному составу магмы Корякского вулкана, перекрытие с составами Авачинского вулкана может свидетельствовать о некотором взаимодействии питающих систем этих двух вулканов, хотя такой вариант представляется менее вероятным. Для решения этого вопроса, важного для прогноза вулканической опасности, связанной с Авачинским и Корякским вулканами, находящимися в непосредственной близости от Петропавловска-Камчатского, требуются дальнейшие исследования.

В любом случае, ясно, что в проанализированном нами образце пепла извержения вулкана Корякского присутствовало небольшое количество свежего стекла. А.П. Максимов с соавторами (2011) не обнаружили частиц свежего магматического стекла в образцах пеплов, отобранных в марте-апреле 2009 г., при просмотре их под биноклем. В то же время, при микроскопических исследованиях этих же образцов в них было обнаружено вулканическое стекло с широким диапазоном содержания  $\text{SiO}_2$  (60–80%) (Максимов и др., 2011), что в целом согласуется с нашими данными.

Вулкан **Пик Сарычева** (рис. 1) образует северо-западную часть о. Матуа (Курильские острова). Этот вулкан является наиболее активно действующим голоценовым вулканом Курильской островной дуги (Дегтерев и др., 2011). Последнее извержение вулкана Пик Сарычева произошло с 11 по 19 июня 2009 г. и носило чисто эксплозивный характер: эруптивные тучи поднимались на высоту до 16–21 км, а объем выброшенной пирокластической массы оценен в  $0.4 \text{ км}^3$  (Рыбин и др., 2010). Пепловые шлейфы протягивались на расстояние до 3000 км. Впервые за историческое время наблюдалось выпадение пепла на территории о. Сахалин, а также на северо-востоке Хабаровского края. Извержение выбросило большое количество ( $1.2 \pm 0.2 \text{ Тг}$ ) двуокиси серы в верхнюю тропосферу и нижние слои стратосферы и вошло в число десяти самых крупных в мире вулканических эмиссий серы за последние 50 лет (Haywood et al., 2010).

Нами изучались образцы пирокластики отобранные на о-ве Матуа непосредственно после извержения летом 2009 г. Типичный пепел имеет облик мелкозернистого песка с преобладанием частиц менее 100 мкм, отдельные фрагменты достигают размера 300 мкм (рис. 4e). В пепле присутствуют ювенильные частицы с различной пропорцией стекла и микролитов. Содержание микролитов плагиоклаза, пироксена и магнетита не менее 30%. Среди вкрапленников установлены плагиоклаз, клинопироксен, магнетит, редкие микрофенокристы оливина. Стекла несколько варьируют по интенсивности потока отраженных электронов (тон окраски на фото), что может отражать вариации их состава, связанные с разной степенью закристаллизованности. Пепел, собранный в Южно-Сахалинске, имеет аналогичный состав, но меньшую размерность частиц (см. электронное приложение [http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem\\_eruptions.rar](http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/data/chem_eruptions.rar)). Более подробные сведения о пеплах извержения 2009 г. приведены в работе (Рыбин и др. 2010).

Стекла из тефры вулкана Пик Сарычева варьируют от андезитов до дацитов и отличаются наибольшим содержанием фосфора и особенно хлора (рис. 3), что вероятно является отличительной особенностью источника их родоначальных магм. Большинство стекол имеет умеренно-калиевый андезитовый состав. К сожалению, мы не располагаем анализами стекол из тефры предыдущих извержений этого вулкана, поэтому не можем определить тренд в эволюции его расплавов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение тефры пяти извержений, произошедших на Камчатке и Курильских островах в 2009-2011 гг., методами электронной микроскопии и высокоточного электронно-зондового микроанализа дало следующие результаты.

Тефра извержений вулканов Ключевской, Кизимен и Пик Сарычева представлена преимущественно закаленными при контакте с воздухом фрагментами магмы, содержащей отдельные кристаллы. Такие фрагменты интерпретируются нами как ювенильный материал. Среди изверженных продуктов вулканов Шивелуч, Корякский и начальных извержений вулкана Кизимен присутствуют обломки раскристаллизованных, часто гидротермально измененных пород, которые интерпретируются как резургентный материал и, вероятно, представляют собой фрагменты постройки вулкана (Корякский, Кизимен) или растущего купола (Шивелуч).

Большинство проанализированных нами стекол имеют нормальную щелочность и

умеренно-калиевый состав (рис. 2) в соответствии с преобладающим типом магм на Камчатке. При увеличении содержания  $\text{SiO}_2$  в стеклах наблюдается закономерное уменьшение содержаний  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ , что отражает эволюцию состава расплава при совместной кристаллизации Fe-Ti оксидов (магнетит, ильменит), плагиоклаза, пироксенов и также амфибола (в случае вулканов Шивелуч и Кизимен) и соответствует минеральному составу изученных пород. В области андезитовых составов стекла вулкана Ключевской наиболее обогащены Fe и Ti и обеднены Al. В группе риолитовых составов стекла вулкана Кизимен имеют более высокие содержания Al, Ca и Cl и пониженные содержания Na и Ti по сравнению со стеклами вулкана Шивелуч. Стекла вулкана Пик Сарычева на Курильских островах отличаются наибольшим содержанием фосфора и особенно хлора, что, вероятно, связано с особенностями источника их родоначальных магм.

Среди вулканов, извергавшихся в течение 2009-2011 гг., наибольшая вероятность крупного извержения в настоящее время существует для вулкана Кизимен. Изученные стекла извержения 2010-2011 гг. вулкана Кизимен имеют состав, идентичный стеклам из продуктов крупных доисторических извержений, что свидетельствует о наличии под вулканом магматического очага стабильного высококремнистого состава на протяжении по крайней мере последних 10 тыс. лет. Такой вывод существенно меняет сложившееся представление о том, что в последние тысячи лет мафическая магма полностью вытеснила ранее существовавший очаг кислой магмы (Мелекесцев и др., 1992).

Составы стекол извержений 2009-2011 гг. вулканов Ключевской и Шивелуч соответствуют ожидаемым для данного этапа их развития. Большая часть тефры, извергнутой во время извержения вулкана Шивелуч в 2010 г. представляет собой фрагменты растущего экструзивного купола вулкана или же магматический материал, находившийся на малых глубинах. Составы стекол вулкана Ключевского в 2010 г. находятся в полном соответствии с эволюцией составов магм Ключевского вулкана за последние 7 тысяч лет. Это позволяет предположить, что через несколько сотен лет на Ключевском могут произойти гораздо более крупные извержения, чем те, которые известны из исторических хроник.

Два изученных нами образца содержат разнородный материал и скорее всего представляют собой смесь тефры разных вулканов. Образец тефры вулкана Корякского, возможно, загрязнен частицами переотложенной тефры вулкана Авачинский, а образец начальной тефры вулкана Кизимен, отобранный в пос. Козыревск, — части-

цами тефры вулкана Ключевской. Практически все тефры содержат какое-то количество резургентного материала, а в тефре вулкана Корякский и начальных извержений вулкана Кизимен он преобладает. Анализ валовых проб в таких случаях дает искаженное представление о составе изверженного материала. Не исключено, что именно с этим загрязнением связаны особенности валового состава пепла вулкана Кизимен, отобранного в пос. Козыревск, которые отмечаются в работе (Малик, Овсянников, 2011). Это подчеркивает важность, во-первых, детального изучения частиц тефры под микроскопом, а во-вторых, применения методов анализа, позволяющих анализировать отдельные частицы, а не только валовый образец.

Результаты нашей работы показывают, что изучение пеплов текущих извержений дает важный материал для понимания состояния магматической системы под вулканом и прогноза развития событий и должно стать обязательной частью мониторинга текущей вулканической активности. Качество подобных исследований в первую очередь зависит от представительности коллекции тефры и тщательности документации каждого образца, которая облегчает интерпретацию результатов. При детальном отборе и четкой привязке образцов ко времени извержения оказывается возможным не только проследить поступление магм разного состава в питающую систему вулкана, но и увязать основные магматические и сейсмические события.

Авторы благодарят Л.И. Базанову, Е.С. Власова, Н.А. Малик, И.В. Мелекесцева, А.А. Овсянникова, А.В. Рыбина и С.Б. Самойленко за предоставленные образцы пеплов современных и прошлых извержений. Работа выполнена при поддержке российско-германского проекта KALMAR (BMBF 03G0640A,B). Авторы благодарны анонимным рецензентам за замечания, которые позволили улучшить статью.

#### Список литературы

*Базанова Л.И., Брайцева О.А., Дирксен О.В. и др.* Пеплопады крупнейших голоценовых извержений на траверсе Усть-Большерецк - Петропавловск-Камчатский: источники, хронология, частота // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 30-46.

*Базанова Л.И., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Корякский: реконструкция динамики эруптивной активности за последние 10-12 тысяч лет // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 1. С. 269-272.

*Брайцева О.А., Егорова И. А., Сулержицкий Л.Д.* Тейхронологические исследования вулкана Карымский // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 48-59.

*Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3-24.

*Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 5-95.

*Вольнец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д.* Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 2. С. 206-221.

*Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др.* Активность вулкана Корякский с октября 2008 г. по октябрь 2009 г. по данным KVERT // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 15-23.

*Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г.* Активность вулкана Шивелуч по видео и спутниковым данным // Вулканизм и геодинамика. Материалы V Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011а. С. 410-413.

*Гирина О.А., Маневич А.Г., Ушаков С.В. и др.* Активность вулканов Камчатки в 2010 г. // Материалы региональной конференции, «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011б. С. 19-24

*Горшков Г.С.* Состояние вулканов Северной Камчатки в 1956 г. // Бюл. вулканол. станций. 1958. № 27. С. 3.

*Гущенко И.И.* Состояние Корякского вулкана в апреле-мае 1957 г. // Бюл. вулканол. станций. 1959. № 28. С. 3-21.

*Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. и др.* Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэрофотосъемочных облетов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г. // Материалы региональной конференции, «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 26-36

*Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г.* Исторические извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Выпуск № 17. С. 102-119.

*Максимов А.П., Аникин Л.П., Вергасова Л.П. и др.* Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и

- генезис // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. № 18. С. 73-86.
- Малик Н.А., Овсянников А.А. Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7-10.
- Маренина Т.Ю., Сирин А.Н., Тимербаева К.М. Корякский вулкан на Камчатке // Тр. Лаб. вулканологии. 1962. Вып. 22. С. 57-130.
- Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
- Мелекесцев И.В. Вулкан Корякский (Камчатка): извержение 1895-96 гг. выделено ошибочно // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 91-95.
- Мелекесцев И.В., Волинец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84-92.
- Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Волинец О.Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) – будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3-32.
- Новограбленов П.Т. Извержение Авачинского вулкана в 1926 г. // Изв. Гос. РГО: Л.-М., 1926. Т. 53. Вып. 2. С. 79-92.
- Овсянников А.А., Маневич А.Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 7-9.
- Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В. Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22-37.
- Портнягин М.В., Наумов В.Б., Миронов Н.Л. и др. Состав и эволюция расплавов извержения 1996 года в Карымском озере (Восточная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2011. № 11. С. 1153-1178.
- Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Ганзей К.С. и др. Извержение вулкана Пик Сарычева в 2009 г. / Под ред. Б.В. Левина. М.: Янус-К, 2010. 48 с.
- Сирин А.И., Тимербаева К. М. Извержение Корякского вулкана 1956-1957 гг. // Бюл. вулканол. станций. 1959. № 28. С. 3-21.
- Armb J.T. CITZAF: A package of correction programs for the quantitative electron microbeam X-ray analysis of thick polished materials, thin films, and particles. Microbeam Analysis. 1995. № 4. P. 177-200.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240, the greatest explosive event of our era in Kamchatka // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1996. V. 70. № 1-2. P. 49-66.
- Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. V. 47. P. 125-139.
- 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 // Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. (Eds) "Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region", American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2007, V. 172: 303-323.
- Davidson J., DeSilva S. Composite volcanoes / Sigurdsson, H., ed. Encyclopedia of Volcanoes. San Diego: Academic Press, 2000. P. 663-682.
- Dirksen O., van den Bogaard C., Danhara T., Diekmann B. Tephrochronological investigation at Dvuh-yurtochnoe lake area, Kamchatka: Numerous landslides and lake tsunamis, and their environmental impacts // Quaternary International. 2011. V. 246. P. 298-311.
- Jarosewich E.J., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference samples for electron microprobe analysis // Geostandards Newsletter. 1980. V. 4. P. 43-47.
- Gill J.B. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
- Haywood J.M., Jones A., Clarisse L. et al. Observations of the eruption of the Sarychev volcano and simulations using the HadGEM2 climate model // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. P. D21212.
- Heiken G. An atlas of volcanic ash // Smithsonian Contributions to Earth Science. 1974. V. 12. P. 1-101.
- Heiken G., Wohletz K. Volcanic ash. Berkeley: University of California Press, 1985. 246 p.
- Kuehn S.C., Froese D.G., Shane P.A.R. The INTAV intercomparison of electron-beam microanalysis of glass by tephrochronology laboratories: Results and recommendations // Quaternary International. 2011. V. 246. Iss. 1-2. P. 19-47.
- Kyle P.R., Ponomareva V.V., Rourke Schlupe R. Geochemical characterization of marker tephra layers from major Holocene eruptions in Kamchatka, Russia // International Geology Review. 2011. V. 53. № 9. P. 1059-1097.
- Le Bas M. J., Le Maitre r. W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // Journal of Petrology. 1986. V. 27. P. 745-750.
- Mosbah M., Metrich N., Massiot P. PIGME fluorine determination using a nuclear microprobe with application to glass inclusions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1991. V. B58. P. 227-231.
- Neal C., Girina O., Senyukov S. et al. Russian eruption warning systems for aviation // Natural Hazards. 2009. V. 51. № 2. P. 245-262.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al. The 7600 (<sup>14</sup>C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and

- field relationships // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 136. P. 199-222.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M. et al.* Holocene eruptive history of Shiveluch volcano. Kamchatka Peninsula // Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. (Eds) "Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region", American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2007, V. 172: 263-282
- Ponomareva V., Portnyagin M., Blaauw M. et al.* Variations of glass composition in the Holocene tephra of Shiveluch volcano (Kamchatka): applications for magmatic history and tephrochronology // American Geophysical Union. 2011. Fall Meeting. Abstract V43C-2585.
- Portnyagin M., Borisova A. Y., Plechov P. et al.* Magma mixing during the 2010 Eyjafjallajökull eruption // American Geophysical Union. 2011a. Fall Meeting. Abstract V33D-2676.
- Portnyagin M., Mironov N., Ponomareva V. et al.* Arc magmas from slab to eruption: The case of Kliuchevskoy volcano // *Mineralogical Magazine*. 2011b. V. 75. P. 1661.
- Webley P. W., Dean K., Peterson R. et al.* Dispersion modeling of volcanic ash clouds: North Pacific eruptions, the past 40 years: 1970–2010 // *Natural Hazards*. 2012. V. 61. № 2. P. 661–671.
- Williams D., Thomas H.E., Watson M.I.* A multi-sensor analysis of the 2009 eruption of Sarychev Peak, Kuril Islands: A case study for hazards to aviation // American Geophysical Union. 2010. Fall Meeting, Abstract NH43A-1494.

## COMPOSITION OF TEPHRA FROM MODERN (2009-2011) ERUPTIONS OF THE KAMCHATKA AND KURILE ISLANDS VOLCANOES

V.V. Ponomareva<sup>1</sup>, M.V. Portnyagin<sup>2,3</sup>, D.V. Melnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Piip Blvd. 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

<sup>2</sup>*GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Киль, Германия*

<sup>3</sup>*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Kosygin Str. 19, 119991, Moscow*

We report new electron microscopy and high-precision EMP data on tephra from five modern (2009-2011) eruptions from Kamchatka and Kurile Islands volcanoes. All the studied tephra contain fresh volcanic glass. Fresh magmatic material prevails in Kliuchevskoi and Sarychev Peak tephra as well as in tephra erupted from Kizimen volcano in January 2011. Tephra from the initial eruptions of Kizimen volcano (December 2011) and from Shiveluch and Koriaksky eruptions mainly consist of crystallized rock fragments and crystals with subordinate amount of glass. Most of the analyzed volcanic glass shards have normal alkalinity and moderate-K composition as the majority of Kamchatkan magmas. Composition of glasses from the 2010 eruptions of Kliuchevskoi and Shiveluch are consistent with the expected ones for the current period of their evolution. Composition of volcanic glass from the 2010-2011 eruptions from Kizimen is identical to that from its largest pre-historic eruptions. This fact implies that a magmatic chamber of stable rhyolitic composition has been present under Kizimen volcano for at least 10 kyr.

*Keywords: modern explosive eruptions, tephra, volcanic glass, electron-probe analysis.*