

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА СТЕКОЛ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ГОЛОЦЕНОВОЙ ТЕФРЕ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ, КАМЧАТКА

А.Д. Бабанский<sup>1</sup>, М.Л. Толстых<sup>2</sup>, М.М. Певзнер<sup>3</sup>, В.Б. Наумов<sup>2</sup>, Н.Н. Кононкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, e-mail: baban@igem.ru

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, e-mail: naumov@geokhi.ru

<sup>3</sup> Геологический институт РАН, Москва, e-mail: m\_pevzner@mail.ru

Вулкан Шивелуч расположен в северной части Центральной Камчатской депрессии в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Современный действующий аппарат Молодой Шивелуч - один из крупнейших эксплозивных центров Камчатки - в настоящее время представляет собой экструзивный купол. В течение последних 10000 лет произошло не менее 40 крупных плинианских извержений (с объемом более 0,5 км<sup>3</sup>) и около 30 умеренных извержений (с объемом 0,1-0,5 км<sup>3</sup>), связанных с ростом экструзивных куполов [Ponomareva et al., 1998].

Среди продуктов голоценовых извержений вулкана Шивелуч преобладают довольно монотонные по составу умереннокалиевые магнезиальные андезиты. Основные породы очень редки – в голоцене известно всего два извержения базальтов [Волынец и др., 1997; Ponomareva et al., 2007].

В нашей работе сделана попытка реконструировать эволюцию магматического очага вулкана Шивелуч в голоцене, основываясь на изучении расплавных включений в минералах-вкрапленниках пород разного возраста.

Были выбраны несколько образцов тефры, характеризующих разновозрастные извержения вулкана. Из них 4 представлены андезитовой пемзой, а один – базальтовым шлаком извержения 3600 <sup>14</sup>C лет назад. Состав изученных пород приведен в таблице 1.

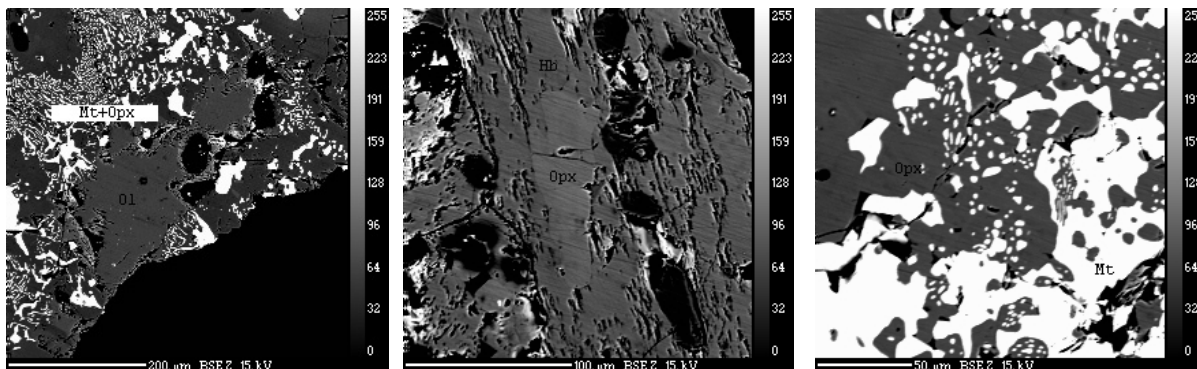
**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) изученных пород и минералов

| Ком-нт                         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9      | 10    | 11    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 63.10 | 59.90 | 50.06 | 61.55 | 45.17 | 46.04 | 52.90 | 52.12 | 39.25  | 0.08  | 0.11  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.55  | 0.57  | 0.67  | 0.63  | 1.75  | 1.41  | 1.17  | 0.30  | 0.05   | 5.66  | 4.20  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.93 | 16.66 | 12.27 | 16.15 | 9.19  | 8.31  | 5.41  | 2.05  | 0.04   | 1.67  | 2.06  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.06  | 2.12  | 3.12  | 1.47  | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -     |
| FeO                            | 2.19  | 2.62  | 5.52  | 3.00  | 12.18 | 10.68 | 16.05 | 7.86  | 19.49  | 84.81 | 78.64 |
| MnO                            | 0.09  | 0.14  | 0.13  | 0.10  | 0.26  | 0.23  | 0.85  | 0.49  | 0.45   | 0.59  | 0.46  |
| MgO                            | 2.37  | 3.40  | 15.02 | 3.61  | 14.41 | 16.07 | 17.18 | 14.13 | 41.57  | 1.47  | 3.00  |
| CaO                            | 5.17  | 5.64  | 8.46  | 5.88  | 11.42 | 11.08 | 3.70  | 20.96 | 0.05   | 0.01  | 0.02  |
| Na <sub>2</sub> O              | 4.26  | 4.85  | 2.31  | 4.39  | 2.03  | 1.82  | 0.59  | 0.49  | 0.02   | 0.01  | 0.00  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.43  | 1.55  | 1.68  | 1.51  | 0.42  | 0.56  | 0.22  | 0.12  | 0.01   | 0.02  | 0.00  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -     | 0.17  | 0.56  | -     | 0.07  | 0.22  | 0.00  | -     | 0.16   | 0.20  | 0.12  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | 0.48  | 5.09  |
| H <sub>2</sub> O-              | 0.46  | 0.64  | -     | 0.29  | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -     |
| H <sub>2</sub> O+              | 1.67  | 1.41  | -     | 0.69  | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -     |
| Сумма                          | 99.28 | 99.67 | 99.80 | 99.27 | 96.90 | 96.42 | 98.07 | 98.52 | 101.09 | 95.00 | 93.70 |
| n                              | 1     | 1     | 1     | 1     | 13    | 5     | 8     | 2     | 1      | 1     | 1     |
| Возраст                        | 8000  | 6900  | 3600  | 1964  | -     | -     | -     | -     | -      | -     | -     |

Примечание. 1-4 – породы: 1-обр. 609/11, 2-обр. 1264/8, 3-обр. 1188/1, 4-обр. 1264/1; Возраст – радиоуглеродных лет, <sup>14</sup>C, 1964 - год извержения; 5, 6 – средние составы амфиболов андезитов и базальта, соответственно; 7 – средний состав ортопироксена гомеогенных включений в андезитах; 8 – клинопироксен кристаллических включений; 9 – реликтовый оливин гомеогенных включений; 10, 11 – рудный минерал гомеогенных включений.

Тефра андезитового состава представлена пористой светлоокрашенной пемзой. Содержание вкрапленников в породе достигает 40 об.%. Среди них преобладают зональный плагиоклаз (An 35-62, преобладает 40-55) и амфибол, в меньшем количестве присутствует титаномагнетит (табл. 1).

Для андезитов характерны многочисленные кристаллические обособления (гомеогенные включения?) в виде либо реликтов магнезиального оливина с каймой из ортопироксена и магнетита, либо пироксен-магнетитовых агрегатов со специфическими структурами. Амфибол, присутствующий в таких сростаниях, развивается по пироксену (рис. 1). В темно-сером базальтовом шлаке, содержащем до 20 об.% вкрапленников, к упомянутым плагиоклазу и амфиболу присоединяются магнезиальный оливин, клинопироксен, шпинель и эпизодически флогопит. Основная масса пород представлена буроватым стеклом с микролитами плагиоклаза и магнетита (+/-пироксены для базальта).



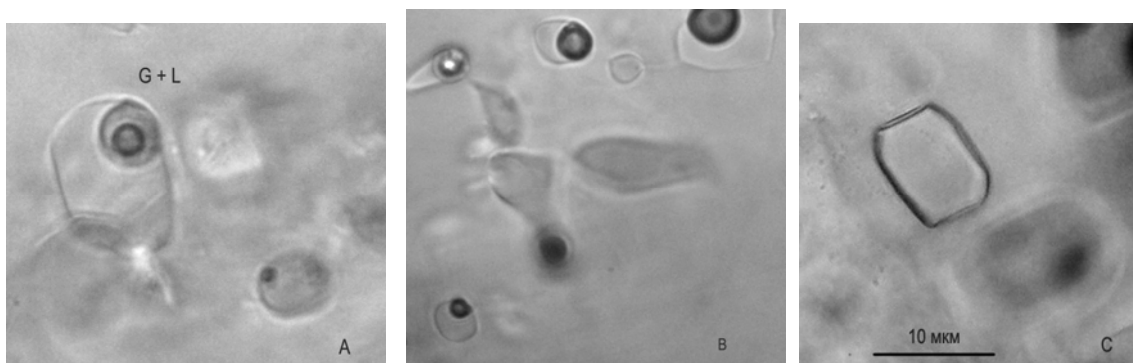
**Рис. 1.** Структуры замещения и перекристаллизации в гомеогенных включениях андезитов. В темно-сером базальтовом шлаке, содержащем до 20 об.% вкрапленников, к упомянутым плагиоклазу и амфиболу присоединяются магнезиальный оливин, ортопироксен, шпинель и эпизодически флогопит.

В минералах-вкрапленниках изученных пород содержатся включения трёх типов: кристаллические, расплавные и флюидные.

Кристаллические включения – апатит, титаномagnetит, плагиоклаз, амфибол и пироксены, в т.ч. клинопироксен (табл.1).

Флюидные включения наиболее характерны для плагиоклаза, отдельные зоны которого содержат иногда целые скопления таких включений. Сопутствующие флюидные включения представлены чистым  $\text{CO}_2$  с плотностью  $0.17-0.45 \text{ г/см}^3$ .

Расплавные включения (рис. 2) представляют собой обособления правильной формы, размер которых не превышает 40 мкм (чаще 5-15 мкм). Преобладают двухфазные включения с объемом газовой фазы около 10%. Для части включений можно предполагать гетерогенный захват, поскольку объем газовой фазы в них существенно варьирует.



**Рис. 2.** Расплавные включения в плагиоклазе андезитовой тефры вулкана Шивелуч. А – включение с двухфазным газовой-жидким флюидом, В – включение с флюидными пузырьками разного объема, С – природно гомогенное включение.

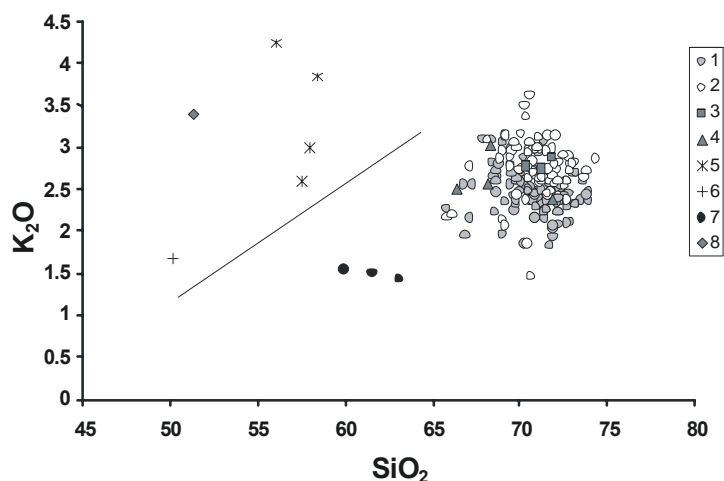
Было получено более 150 анализов стекол расплавных включений и основной массы пород (табл. 2). Мы анализировали негретые включения, поскольку ранее проведенные термические эксперименты [Tolstykh et al., 2000] показали, что стекла гомогенизированных и негретых включений очень близки по составу.

**Таблица 2.** Представительные составы (мас. %) стекол расплавных включений в плагиоклазе и амфиболе, а также стекол основной массы пород

| Компонент                      | 1     | 2      | 3     | 4     | 5     | 6      | 7      | 8      | 9     | 10    |
|--------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 75.10 | 70.00* | 69.75 | 70.89 | 73.91 | 71.89* | 70.39* | 68.38* | 56.76 | 58.18 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.26  | 0.28   | 0.15  | 0.23  | 0.22  | 0.25   | 0.16   | 0.4    | 0.55  | 0.62  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.25 | 12.97  | 14.32 | 12.6  | 13.32 | 13.32  | 12.32  | 13.82  | 17.81 | 17.78 |
| FeO                            | 1.18  | 1.32   | 1.55  | 1.1   | 1.50  | 1.15   | 0.89   | 1.45   | 6.48  | 4.71  |
| MnO                            | 0.05  | 0.05   | 0.05  | 0.07  | 0.06  | 0.05   | 0.02   | 0.08   | 0.15  | 0.18  |
| MgO                            | 0.32  | 0.34   | 0.3   | 0.33  | 0.26  | 0.31   | 0.23   | 0.43   | 1.75  | 1.62  |
| CaO                            | 1.23  | 1.34   | 1.61  | 1.26  | 1.29  | 1.36   | 1.56   | 1.39   | 6.31  | 6.50  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.34  | 3.61*  | 3.87  | 3.75  | 3.70  | 3.27*  | 4.07*  | 3.85*  | 3.56  | 3.81  |
| K <sub>2</sub> O               | 2.42  | 2.44   | 2.59  | 2.47  | 2.83  | 2.75   | 2.78   | 3.03   | 3.41  | 3.41  |
| Cl                             | 0.10  | 0.14   | 0.17  | 0.1   | 0.03  | 0.03   | 0.3    | 0.29   | 0.82  | 0.84  |
| S                              | 0.01  | 0.03   | 0.01  | 0     | 0.05  | 0.09   | 0.49   | 0.04   | 0.20  | 0.06  |
| Сумма                          | 97.24 | 92.53  | 94.37 | 92.81 | 97.15 | 94.48  | 93.17  | 93.16  | 97.83 | 97.73 |
| Растр                          |       |        | 12x12 | 12x12 |       | 5x5    | 5x5    | 6x6    |       | 5x5   |
| n                              | 6     | 100    | 1     | 1     | 4     | 69     | 1      | 1      | 2     | 2     |
| Возраст                        | 8000  | 8000   | 8000  | 8000  | 6900  | 6900   | 1964   | 3500   | 3600  | 3600  |

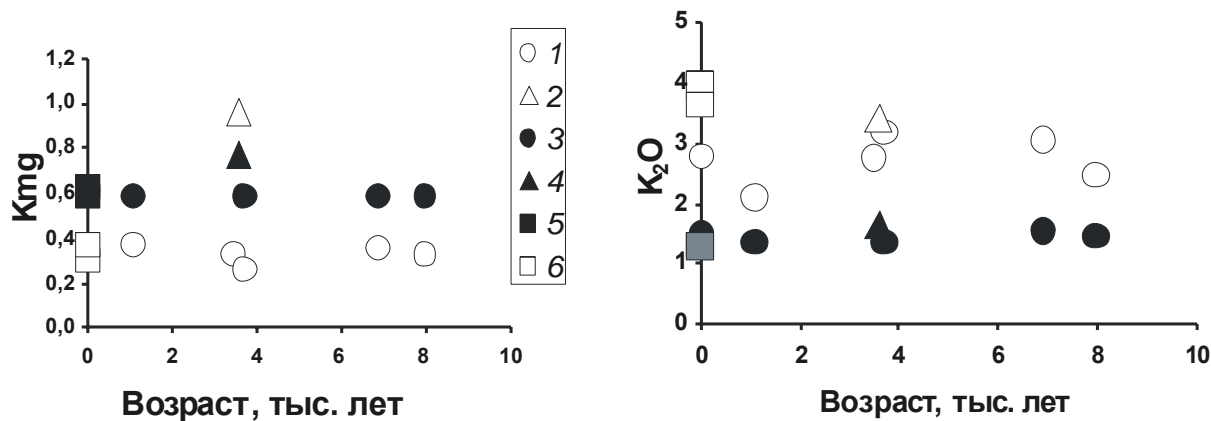
Примечание. 1, 5, 9 – средние составы стекол основной массы; 2, 6, 10 – средние составы стекол расплавных включений в минералах; 3, 4 – включения в амфиболе и плагиоклазе, соответственно; 7, 8 – представительные анализы стекол включений. \* - значения с поправкой на потери Na и завышение содержания SiO<sub>2</sub> при малой площади анализируемого включения. Возраст – см. таб. 1.

**Обсуждение результатов.** Из приведённых данных видно, что стекла расплавных включений в плагиоклазе и амфиболе андезитовой тефры близки по составу и отличаются от пород повышенным содержанием кремнезема и оксидов натрия и калия. На диаграмме SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (рис. 3) фигуративные точки пород и стекол включений образуют дискретные группы. При этом каких-либо закономерных зависимостей между составом стекол расплавных включений и составом содержащих их минералов не обнаружено.



**Рис. 3.** Вариации содержания K<sub>2</sub>O в зависимости от содержания SiO<sub>2</sub> в тефре, стеклах основной массы и стеклах расплавных включений в минералах. 1-4 - стекла расплавных включений и основной массы андезитовой тефры (возраст 8000, 6900, 3500 <sup>14</sup>C лет и извержения 1964 г., соответственно); 5 - стекла включений и основной массы базальта; 6, 7 – базальт (3600 <sup>14</sup>C лет) и андезиты, соответственно; 8 – стекло расплавного включения в оливине базальта.

Вместе с тем, петрографические особенности андезитовой тефры и очень близкие составы стекол расплавных включений в главных вкрапленниках пород – плагиоклазах и амфиболах – позволяют предположить практически одновременную (котектическую?) кристаллизацию этих минералов. Повышенное содержание анортитового минала в плагиоклазе, кристаллизующемся из данного расплава, может объясняться значительным содержанием в нем воды [Naney, 1983], что косвенно подтверждают и низкие суммы микрозондовых анализов. Также нет четкой корреляции между составом стекол включений и возрастом изученной



**Рис. 4.** Зависимость составов расплавов и пород вулкана Шивелуч от возраста. 1 – стекла включений в андезитовой тефре, 2 – стекло включений в базальте, 3 – андезитовая тефра, 4 – базальты, 5 – андезиты экструзий (1993 и 1995 гг.), 6 – стекла включений в минералах экструзий.

андезитовой тефры. Ранее то же самое было показано на основе составов пород голоценовой тефры вулкана Шивелуч [Бабанский и др., 2000]. Учитывая характер различий в составах пород и стекол расплавных включений (рис. 4), это является вполне закономерным. Изученном базальте стекло расплавных включений в оливине и отвечающее ему стекло основной массы имеют, соответственно, базальтовый и андезибазальтовый состав. К тому же они наследуют свойственное этому базальту повышенное содержание  $K_2O$ , попадая в область пород высококалиевой серии. В то же время, стекло включений в амфиболе базальта и андезитовой пемзы имеет близкий состав, в том числе и по содержанию оксида калия, попадая в область умереннокалиевых пород. Отметим, что по геохимическим характеристикам голоценовые андезиты вулкана Шивелуч генетически не связаны с калиевыми базальтами извержения 3600  $^{14}C$  лет [Волынец и др., 1997]. Принимая во внимание близкий состав амфиболов в базальте и андезитовой тефре, можно предположить, что изученный в базальте этого извержения амфибол имеет кумулятивный характер и кристаллизовался из кислого расплава. Кроме того, в андезитовой тефре присутствуют неравновесные кристаллические фазы – оливин, пироксен, и специфические минеральные сростания, обычно рассматриваемые как гомеогенные включения (crystal clots в англоязычной литературе). Эти факты однозначно свидетельствуют о широком развитии процессов фракционирования при формировании андезитовой тефры.

**Выводы.** 1. Установлено, что исходный магматический расплав для андезитов вулкана Шивелуч соответствовал по составу дациту-риолиту и был постоянен на протяжении, по крайней мере, последних 10000 лет. 2. Для одного из двух уникальных для вулкана Шивелуч извержения базальтов установлен исходный базальтовый расплав. 3. Установлена важная роль процессов фракционирования при кристаллизации исходного кислого расплава. 4. Изменений состава пород и исходных расплавов за последние 10000 лет не выявлено. Но примерно 3600  $^{14}C$  лет назад в существенно дацитовый магматический очаг поступила магма высококалиевого магнезиального базальта. Кратковременность совместного пребывания в очаге не привела к заметному изменению его состава. Поэтому продукты данного извержения содержат преимущественно базальтовую тефру.

Авторы благодарны А.В. Гирнису, А.Р. Котельникову, П.Ю. Плечову и И.П. Солововой за плодотворные обсуждения полученных результатов, а также В.В. Пономаревой за предоставленные образцы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-05-00536, 07-05-00497).

#### Список литературы

- Бабанский А.Д. и др.** Вулкан Шивелуч (Камчатка, Россия): особенности магматизма в голоценовой эруптивной истории // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Материалы Второго Всероссийского Петрографического совещания. Сыктывкар. 2000. Т. 2.
- Волынец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А. Д.** Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // Петрология, 1997. Т. 5. № 2. С. 206-221.

**Naney M.T.** Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems // *Am. J. Sci.* 1983. V. 283. P. 993-033.

**Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M. et al.** Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula. In: Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. (Eds) "Volcanism and Tectonics of the Kamchatka Peninsula and Adjacent Arcs", *Geophys. Monogr. Ser.*, 2007. V. 172. P. 263-282.

**Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestsev I.V.** Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Volcanology.* 1998. V. 59. P. 490-505.

**Tolstykh M.L., Naumov V.B., Babanskii A.D. et al.** Chemical composition, trace elements, and volatile components of melt inclusions in minerals from andesites of the Shiveluch volcano, Kamchatka // *Geochemistry International.* 2000. V. 38. Suppl. 1. P. S123-S132.