

Геохимические особенности темноцветных минералов, продуктов эксплозивной и эффузивной деятельности вулкана Ключевской – показатели присутствия магматических очагов

С.А. Хубуная¹, А.В. Соболев², В.С. Хубуная¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: hubsa@kscnet.ru*

²*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва*

Наличие промежуточных магматических очагов под вулканом Ключевской до сих пор остается дискуссионным [1, 2, 5, 8 и др.]. Между тем, обнаружение магматических камер под вулканами и их изучение является одной из первоочередных задач вулканологии. Эти задачи тесно связаны с решением проблемы генезиса вулканических пород, прогнозом извержений и вулканической опасностью. Наши данные и результаты петрологических работ других исследователей о возможности существования магматических очагов под вулканом Ключевской основываются на детальном изучении петрографии, минералогии и геохимии продуктов вулканической деятельности. Это сообщение посвящено аргументации наличия магматических очагов под постройкой вулкана Ключевской.

Все продукты извержений вулкана Ключевской представлены магнезиальными и глиноземистыми базальтами и андезибазальтами. Подробные петрографические описания представлены в работах [3, 4, 5], где впервые было показано, что во всех магнезиальных и глиноземистых базальтах и андезибазальтах присутствуют неравновесные ассоциации минералов, оливинов и клинопироксенов. Они не могут быть получены из расплавов, соответствующих химическим составам изученных пород. В последнее время получены новые данные по геохимии оливинов и клинопироксенов побочных и вершинных извержений 1938, 1945, 1966, 1994 гг. вулкана Ключевской.

Химический состав вулканических продуктов вершинного извержения 1994 дифференцирован. Шлаковые лапилли и лавы вулканского и стромболианского этапов извержения относятся по составам к умеренно калиевым высокоглиноземистым андезибазальтам. Обломки и глыбы лав из пирокластических потоков плинианского этапа извержения 1994г. отвечают составам умеренно калиевых глиноземистых и магнезиальных базальтов и андезибазальтов. Присутствие двух типов лав в вулканических продуктах одного извержения может свидетельствовать о расслоенности магматической камеры. На расслоенность магматической камеры прямо указывают составы природнозакаленных стекол расплавных включений из оливинов шлаковых лапилли. Составы расплавных включений дифференцированы, от базальтов до андезитов. Очевидно, оливины из шлаковых лапилли были образованы из серии расплавов базальтового, андезибазальтового и андезитового составов. Чтобы это произошло, необходима камера, где мог бы размещаться расплав в равновесных условиях [6]. И эта камера должна быть расслоена. На приповерхностное положение камеры указывают резкая дегазация S и Cl, связанная с подъёмом магматического расплава и дегазацией H₂O [7].

Наиболее характерной чертой всех пород, позволяющей обосновать присутствие магматических очагов под вулканом Ключевской, является растворимость CaO в оливинах при их кристаллизации с падением их магнезиальности ($Mg \times 100/Fe^{2+} + Mg$ (мол.%)). Содержание CaO в оливинах магнезиальных пород с падением магнезиальности от Fo₉₀ до Fo₈₀ незначительно убывает (рис. 1). Концентрация CaO в

оливинах глиноземистых андезибазальтов с падением магнезиальности, наоборот, резко возрастает (см. рис.1).

Еще более парадоксальная ситуация с содержанием CaO в оливинах фиксируется в глиноземистых лавах и даже отдельных образцах побочных извержений 1938, 1945 и 1966 гг. вулкана Ключевской (см. рис.1). Здесь хорошо видна прямо противоположная тенденция поведения CaO в двух группах оливинов, при падении их магнезиальности. В одной группе содержание CaO в оливинах от Fo₉₀ до Fo₈₀ незначительно понижается с падением его магнезиальности. Это может означать кристаллизацию, вызванную понижением температуры в условиях стабильного давления, в режиме Sp-Ol – Crx котектики. Как отмечал J.C. Stromer [11] давление и температура имеют противоположные тенденции на растворимость CaO в оливинах при их кристаллизации. При охлаждении расплава и постоянном давлении содержание CaO в оливине слегка снижается, а при подъеме магмы содержание CaO в оливинах растет. Исходя из химического состава оливина и его окисленности, эта часть Ol кристаллизовалась из высокомагнезиальной магмы в режиме Sp-Ol-Crx котектики [4].

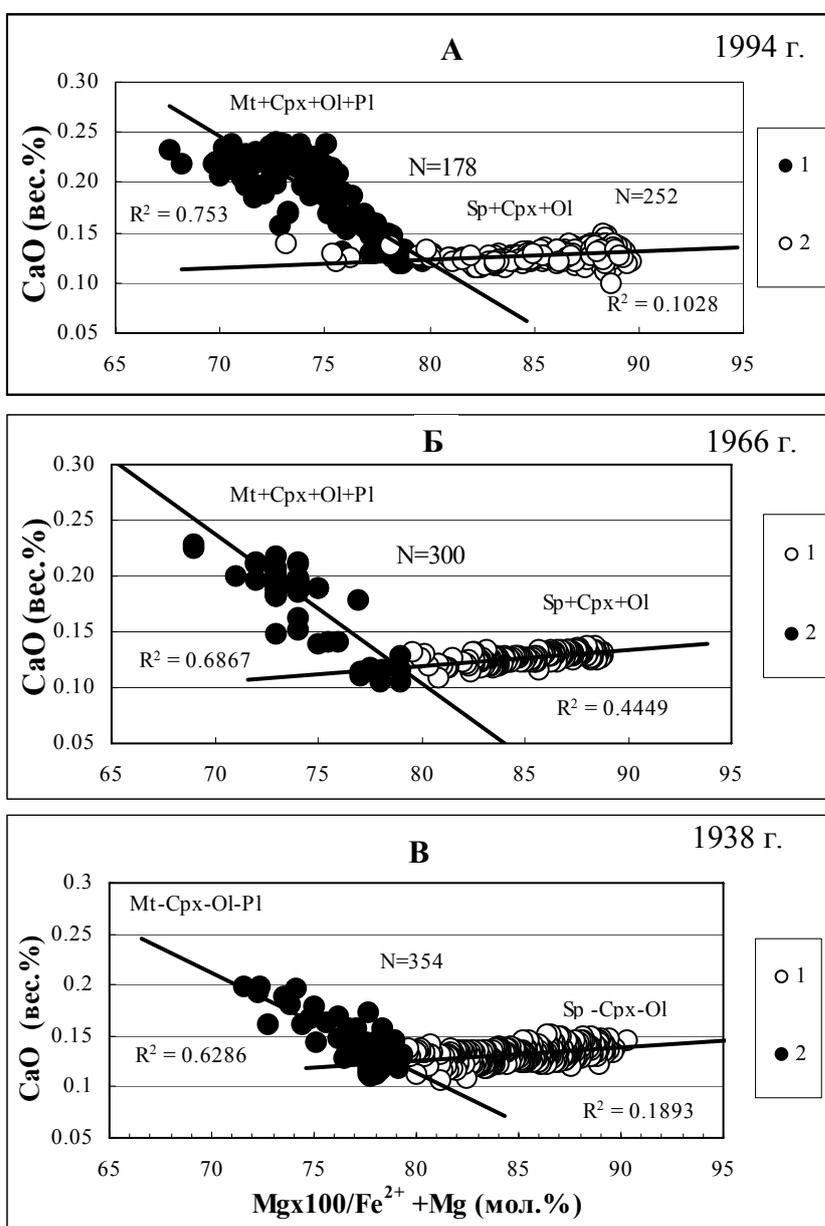


Рис. 1 Составы оливинов магнезиальных и глиноземистых базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской. Примечание: А – извержение 1994 г. 1- оливины глиноземистых андезибазальтов лавового потока; 2-оливины из обломков магнезиальных базальтов пирокластического потока. Б и В – побочное извержение 1938 и 1966 гг. 1- оливины магнезиальных базальтов глубинного очага; 2- оливины глиноземистых андезибазальтов малоглубинного очага. N – количество анализов. R² – достоверная величина аппроксимации; Mgn# - магнезиальность клинопироксенов. Sp, Mt, Crx, Ol, Pl – шпинель, магнетит, клинопироксен, оливин, плагиоклаз., соответственно.

В другой группе оливинов из того же образца, наоборот, концентрация CaO в оливинах после Fo₇₈, значительно возрастает с падением его с магнезиальности (рис. 1). Такие оливины кристаллизовались из глиноземистой магмы в условиях Mt-Crx-Ol-Pl котектики. Последнее положение следует из петрографического анализа и численного моделирования в системе минерал-расплав [3, 4]. Это должно было бы приводить к снижению содержания CaO в остаточном расплаве за счет кристаллизации Crx и Pl и понижению концентрации CaO в оливине, который кристаллизуется из этого расплава. Здесь же фиксируется противоположная тенденция, увеличение содержания CaO в оливине при его кристаллизации из остаточного расплава. Объяснение этому эффекту можно найти в последних исследованиях растворимости CaO в оливинах при их кристаллизации в разных физико-химических условиях. Повышение содержания CaO в Ol может быть связано с понижением давления кристаллизации Ol. Подобная ситуация описана в работе [10]. Как показали работы [9], при кристаллизации оливина с понижением давления и дегазацией H₂O содержание CaO в оливинах резко возрастает. Следует отметить, что высокое содержание воды (до 3 вес.%) в исходных магмах вулкана Ключевской впервые обнаружили [7, 12].

Наличие двух групп оливинов с прямо противоположным поведением CaO при падении их магнезиальности фиксируется в продуктах всех побочных и, части вершинных извержений вулкана Ключевской. Наиболее вероятное объяснение этому феномену – кристаллизация оливинов происходила при разных физико-химических условиях и, как следствие, в разных магматических камерах. Оливины Fo₉₀₋₈₀ кристаллизовались в условиях снижения температуры при стабильном давлении из магнезиальной магмы в глубинной камере [9, 11], в режиме Sp-Ol-Crx котектики. Кристаллизация Crx приводила к незначительному понижению CaO в остаточном расплаве, из которого кристаллизовались Ol. Кристаллизация другой группы оливинов с магнезиальностью после Fo₇₈, происходила в малоглубинной камере, в режиме Mt-Crx-Ol-Pl котектики из глиноземистой магмы. Монотонное повышение CaO в оливинах обусловлено повышением коэффициентов распределения Ca в оливинах, при подъеме магмы и ее дегазации.

Подтверждением кристаллизации оливинов из разных магматических расплавов, в разных магматических камерах служит поведение Al₂O₃ в клинопироксенах в одном и том же образце, при уменьшении их магнезиальности. В побочных прорывах базальтов и андезибазальтов 1938, 1945, 1966 гг. фиксируются две группы клинопироксенов. В одной группе клинопироксенов Al₂O₃ постоянно возрастает до 6-8%, с падением их магнезиальности от Mgn#₉₀ до Mgn#₇₀. В другой группе клинопироксенов, в том же образце и потоке лав, после магнезиальности Mg #₈₀₋₇₅ содержание Al₂O₃ резко снижается до 1-2 %. Очевидно, непрерывный тренд обогащения клинопироксенов Al₂O₃ с падением их магнезиальности от Mg #₉₀ до 75 обусловлен кристаллизацией Crx в режиме Sp-Crx-Ol котектики в глубинной камере вулкана Ключевской. Эти клинопироксены внедрялись в малоглубинную камеру вулкана вместе с магнезиальным расплавом и выше описанными оливинами Fo₉₀₋₈₀. Клинопироксены, в которых содержания Al₂O₃ резко снижаются, по мере падения их магнезиальности, кристаллизовались в режиме Mt-Crx-Ol-Pl котектики в малоглубинной камере из глиноземистой магмы. Кристаллизация плагиоклазов и клинопироксенов обедняла остаточный расплав Al₂O₃. Из этого остаточного расплава кристаллизовались клинопироксены с магнезиальностью ниже Mgn#₈₀₋₇₅ в малоглубинной камере вулкана Ключевской. Дополнительным подтверждением этого положения являются две группы клинопироксенов в одном и том же образце, которые кристаллизовались при одной магнезиальности, но при разных физико-химических условиях, в разных магматических камерах.

Существование магматических очагов под постройкой вулкана Ключевской подтверждается геохимическими особенностями оливинов и клинопироксенов магнезиальных и глиноземистых базальтов и андезибазальтов. Об этом свидетельствуют расслоенность малоглубинной магматической камеры, дуализм в поведении содержаний СаО в оливинах по мере уменьшения их магнезиальности, двойственное поведение Al_2O_3 в клинопироксенах при одной и той же магнезиальности и постоянное присутствие неравновесных высокомагнезиальных ОI и Срх, характерных для мантийных выплавок, в глиноземистых андезибазальтах всех рассматриваемых побочных извержений.

Список литературы

1. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Сторчеус А.В. Глубинные вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21-34.
2. Гонтовая Л.И., Степанова М.А., Хренов А.П., Сеньюков С.Л. // Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3-11.
3. Озеров А.Ю., Хубуная М. А. Химизм оливинов и пироксенов как оказатель генетической связи глиноземистых и магнезиальных базальтов Ключевского вулкана // Постэруптивное минералообразование на активных вулканах Камчатки. Владивосток, 1992. Ч. 2. С. 37-61.
4. Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.М. Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46-68.
5. Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В. Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2007. № 2. С. 3-29.
6. Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Москалева С.В. Малоглубинный очаг вулкана Ключевской (по данным петрологии и геофизики) // Материалы конференции посвященной Дню вулканолога 29-30 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 293-304.
7. Хубуная С.А., Соболев А.В. Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // ДАН, 1998, т. 360, № 1. С. 100 - 102.
8. Koulakov I, Gordeev E., Dobretsov N. et al. Feeding paths of the Kluchtskoy volcano group (Kamchatka) from the results of local earthquake tomography // Geophys. Res. Lett., V. 38, LXXXXX, doi:10.1029/2011GL046957, 2011.
9. Maxim Gavrilenko, Claude Herzberg, Christopher Vidito, et al. Calcium-in-Olivine Geohygrometer and its Application to Subduction Zone Magmatism // Journal of Petrology, 2016, V. 57, No. 9, P. 1811–1832.
10. Simkin T., Smith J.V. Minor element distribution in olivine // J. Geology, 1970, v. 78, P. 304-325.
11. Stromer J.C. Jr, Calcium zoning in olivine and its relationship to silica activity and pressure // Geochim. Cosmochim Acta, 1973, V. 37, P. 1815-1821.
12. Sobolev A.V., Chaussidon M. H₂O concentrations in primary melts from supra - subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle // Earth and Planet, 1996, V. 137. P. 45-55.