

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГМ И ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

А.П. Максимов

Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН

На проблему взаимодействия кислых и основных магм можно взглянуть с двух сторон: петрологической и вулканологической. Петрологическая сторона - это проблема смешения этих магм и образования магм промежуточного состава. К процессам смешения магм в последние годы привлечено повышенное внимание петрологов, так как накоплено достаточно много примеров, свидетельствующих о смешении магм на основании петрологических признаков. Вулканологический аспект проблемы взаимодействия магм связан с механизмом вулканических извержений, в ходе которых и происходит такое взаимодействие. Особенно наглядно и актуально он проявляется при одновременном извержении магм разного состава.

В настоящее время нет ясности как в понимании механизмов смешения, так и механизмов взаимодействия магм разного состава в процессе эксплозивных извержений. Важным аспектом проблемы магматического смешения является физико-химическая обстановка этого процесса.

Крупнейшие эксплозивные извержения столетия. В таблице представлены некоторые характеристики крупнейших эксплозивных извержений XX века. Эти извержения отличаются большими объемами ювенильного материала (около 1 км³ и более) и высокой интенсивностью выноса вещества (десятки-сотни тыс. м³/с). Более половины из них составляют извержения с контрастным составом ювенильных пород, причем разница в содержаниях SiO₂ может достигать почти 20%. Как правило, им свойственны и более значительные объемы изверженного материала. Главную роль среди продуктов таких извержений играют кислые составы, доля которых может превышать 95%. Другую группу образуют извержения с достаточно однородным составом пород. Важно отметить, что для обеих групп характерно наличие пород с амфиболом.

	Вулкан	V, км ³	I	Типы пород	Интервал SiO ₂ , вес. %
1	Санта Мария, Гватемала, 1902	~ 8	60 - 90	Нб-дациты	65,7
2	Ксудач, Камчатка, 1907	2-2.4	?	андезиты -дациты	59,7-65,3
3	Катмай - Новарупта, Аляска, 1912	30-35	>140	андезиты – дациты – риолиты	58,6 - 77,3
4	Квицалу (Сьерро-Ассуль), Чили, 1932	9.5	100-150	базальты - Нб-риолиты	52,4 - 69,8
5	Харимкотан, Курильские о-ва, 1933	?	?	анд.-базальты? -дациты?	55,5? -67,4
6	Безымянный, Камчатка, 1956	1.3 -1.4	~95	Нб-андезиты	~59,8
7	Шивелуч, Камчатка, 1964	0,6 - 0,8	~ 200	Нб-андезиты	~59,9
8	Сент-Хеленс, Каскадные горы, 1980	1.3 -1.4	~ 45	Нб-андезиты	61,0-63,9
9	Эль-Чичон, Мексика, 1982	0.75	~ 12.5	Нб-трахиандезиты	55,9
10	Пинатубо, Филиппины, 1991	~9.4	~ 300	андезиты - Нб-дациты	59,7-64,4
11	Хадсон, Чили, 1991			трахибазальты- трахиандезиты	52 - 62,0
	08-10.08 12-15.08	7,6	~ 30		

Примечания: V - объем ювенильных; I - интенсивность выноса пирокластики, тыс. м³/с. Жирным шрифтом выделены извержения с контрастным составом пород и породы с роговой обманкой (**Нб**).

Контрастные эксплозивные извержения заслуживают особого внимания не только из-за чрезвычайно высоких объемов и интенсивности. Они наглядно доказывают наличие взаимодействия резко различных по составу магм.

Физико-химические модели смешения кислых и основных магм. Экспериментально показано, что смешение базальтовых и кислых магм путем конвекции чрезвычайно затруднено ввиду высокой вязкости андезитовых и более кислых магм. Скорость же диффузии компонентов в расплавах чрезвычайно низка для масштабного смешения за реальное,

с точки зрения вулканических процессов, время. А так как смешиваются не только расплавы, но и заключенные в них кристаллы (образуются неравновесные минеральные ассоциации), то происходит не только химическое, но и механическое смешение. Данное обстоятельство вынудило искать другие механизмы смешения.

Одна из первых предложенных гипотез основана на вскипании насыщенной летучими кислой магмы под влиянием ее нагрева со стороны поступившей в очаг более горячей базальтовой. Однако подобная схема по целому ряду причин представляется мало приемлемой. 1) Эффект температуры на растворимость воды в расплаве весьма мал, что требует значительной разницы в температурах магм и большого объема поступающей в очаг магмы, сопоставимого с объемом магмы очага. 2) Влияние температуры на растворимость может быть и обратным при разных давлениях или даже менять знак при повышении температуры. 3) Известково-щелочные андезитовые магмы характеризуются высокими долями вкрапленников, т.е. находятся в стадии кристаллизации в очагах перед извержениями. При их нагревании будет происходить плавление кристаллов и, соответственно, растворение воды в связи с ростом доли расплава. И, наконец, в протяженных по глубине магматических очагах, в соответствии с требованием термодинамического равновесия, насыщены водой могут быть лишь верхние горизонты очагов, тогда как нижние горизонты должны быть сильно недосыщены.

Дж.Айкельбергер [1] предложил следующую схему. При поступлении порции горячей базальтовой магмы в вышележащий очаг более холодной кислой магмы происходит быстрое охлаждение базальтовой магмы и ее кристаллизация. В результате кристаллизации мафической магмы в ней в несколько раз снижается доля расплава и, соответственно, резко увеличивается концентрация летучих в остаточном расплаве. При коровых давлениях это приводит к дегазации и вспениванию мафической магмы. По мере вспенивания объемная плотность базальтовой магмы снижается, и в определенный момент это может привести к всплыванию обособлений базальтовой магмы сквозь толщу кислой с последующей частичной или полной ассимиляцией базальтовых включений. При этом возрастает давление в очаге и возникает динамическая неустойчивость очага, которая может явиться "спусковым крючком" извержения. Максимальные глубины, на которых возможна инверсия плотностей и всплывание "капель" основной магмы, зависят, в первую очередь, от исходной концентрации воды в этой магме. При реальных для базальтовых магм концентрациях воды процесс флотации ограничен верхними горизонтами коры. Дальнейший анализ этой модели [2] показал, что базальтовая магма в ходе дегазации может достичь плотности сухой или недосыщенной андезитовой, дацитовой или риолитовой магмы при давлениях $\leq 0.5-1,5$ кбар, но при больших давлениях для этого требуются содержания воды в базальтовой магме, превышающие существующие оценки (рис.1).

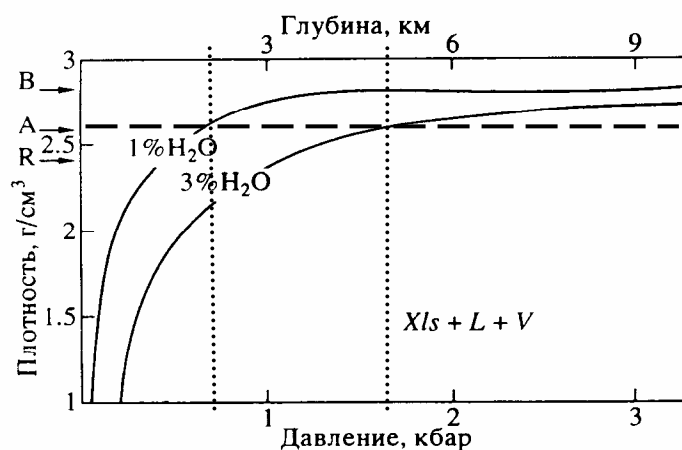


Рис.1. Плотность основной магмы, закристаллизованной на 50%, в зависимости от давления при содержании H_2O 1% и 3% (из [2] с изменениями). В, А, R - плотности безводных базальтовой, андезитовой и риолитовой магм. Пунктир - интервал глубин, ниже которых невозможна инверсия плотностей основной и андезитовой магм.

Если в расчетах глубин инверсии плотностей кислой и основной магм плотность вспененной базальтовой магмы сравнивать не с сухой кислой магмой, а с близкой к насыщению H_2O (особенно это справедливо для вулканических пород с вкрапленниками амфиболов

и/или биотита), то область возможной флотации включений будет ограничена еще меньшими глубинами.

Однако приемлемость предложенных моделей сталкивается с более серьезным возражением: они плохо согласуются с глубинами очагов под вулканами, на которых развиты роговообманковые типы пород.

Глубины кристаллизации кислых вулканитов с Amph. По разным экспериментальным данным амфибол устойчив в расплавах от андезитовых до риолитовых при давлениях более $\sim 1 \pm 0.5$ кбар, т.е. на глубинах $> 2-4.5$ км. Кристаллизация Amph в природных магмах протекает при температурах существенно выше солидуса, т.к. доля вкрапленников в породах с амфиболом, как правило, составляет не более 30-40%. Соответственно, нижний предел кристаллизации пород с амфиболом по давлению увеличивается до 2-3 кбар (глубины $> \sim 6-9$ км). Это хорошо согласуется с геофизическими данными о положении очагов для вулканов с роговообманковыми андезитами: 10-20 км для вулкана Безымянного и более 7 км для вулкана Сент-Хеленс. Согласно петрологическим реконструкциям кристаллизация вкрапленников роговообманковых андезитов вулкана Безымянного протекала при давлениях не менее 3 кбар, т.е. на глубинах $\sim 9-10$ км [3]. Видно, что область эффективного действия обсуждаемой модели смешения магм и инициации извержений ($< 0.5 - 1.5$ кбар, рис. 1) расположена отчетливо выше кровли магматических очагов с Amph. На самом деле это несоответствие еще значительней, поскольку вскипание базальтовой магмы должно происходить не в кровле, а на дне очагов кислой магмы, куда происходит поступление небольших порций основной магмы, т.е., по крайней мере, на несколько км глубже. Таким образом, предложенная модель взаимодействия основной и кислой магм может быть эффективна лишь в очагах, нижние границы которых расположены не глубже первых километров. Отсюда следует маловероятность рассмотренного выше механизма смешения магм в качестве причины, вызывающей вулканические извержения, применительно к вулканам с амфиболовыми андезитами – дацитами. С другой стороны, существует возможность вскипания базальтовой магмы в низах очага, расположенного на достаточно больших глубинах, в случае высоких концентраций воды в поступающей из глубины магме, значительно превышающих обычные оценки.

О глубинах кристаллизации гомеогенных включений. Согласно модели смешения Айкельбергера, включения мафического состава в андезитовых и более кислых магмах являются результатом флотации вскипевшей порции базальтовой магмы со дна очага к его кровле, последующей закалки ее в виде отдельных обособлений и, наконец, извержения с кислой магмой. Возможно, в определенных случаях подобный генезис мафических включений и имеет место. Однако, учитывая изложенное выше, универсальный характер такой схемы представляется маловероятным, и гомеогенные включения нельзя считать отторженцами основной магмы, поступившей в низы очага кислой магмы. Более естественно считать, что они захватываются из кристаллической корки кровли очага и прилегающих к очагу низов вулканического канала при движении магмы к поверхности в ходе извержения.

Физико-химическая модель взаимодействия основной и кислой магм.

Общепринятая точка зрения на процесс взаимодействия магм основана на более глубоком положении основной магмы по отношению к кислой. Однако рассмотрение петролого - вулканологической информации для крупных эксплозивных извержений с контрастным составом продуктов как XX века, так и более древних, дает основание утверждать, что их особенности можно объяснить, если **принять противоположную схему: поступление насыщенной летучими кислой магмы из более глубокого очага в вышерасположенный очаг основной магмы.** При этом преодолевается трудность объяснения проникновения основной магмы к поверхности сквозь толщу кислой, так как кислая магма, будучи изначально насыщена или близка к насыщению летучими, активно дегазирует, поступая в верхний очаг. Из-за большой разницы в вязкостях кислой и основной магм они не могут эффективно смешиваться, и кислая магма ввиду ее более низкой плотности должна всплывать сквозь базальтовую, непрерывно дегазируя по мере продвижения к поверхно-

сти. На небольших глубинах этот процесс приобретает лавинообразный характер, так как здесь происходит резкое увеличение объема летучих. Это приводит к ускорению процесса всплытия.

Если обратиться к контрастным извержениям из таблицы, то подобная схема была предложена для извержений вулканов Ксудач, 1907 [4], Катмай, 1912 [5] и Квицапу, 1846 и 1932 гг. [6,7]. В последнем случае, исходя из модели поступления богатой водой риодацитового магмы в неглубокий базальтовый очаг с равновесным распределением в нем воды, удалось объяснить целый ряд загадок, связанных с современной деятельностью кратера Квицапу: эффузивный характер извержения богатых водой Nb-риодацитов (1-е историческое извержение); проблему “исчезнувшего” большого количества воды (≥ 500 млн. т) и, напротив, резко эксплозивный характер 2-го извержения тех же магм; наличия смешанных пород во втором извержении; длительный этап умеренной эксплозивной активности между извержениями. С предлагаемой позиции были рассмотрены другие подобные извержения, описанные в литературе: минойское извержение вулкана Санторин (Cottrell et al., 1999) и Хоккайдо-Комагатаке, 1929 (Takeuchi, Nakamura, 2001). Это позволило объяснить их петролого-вулканологические особенности и избежать противоречий и трудностей, с которыми столкнулись авторы данных работ, исходя из традиционной точки зрения. Реальность предлагаемой концепции косвенно подтверждается геофизическими данными о строении питающей системы вулкана Авача [8].

Выводы. 1) Модель смешения Айкельбергера, в целом, не может быть признана удовлетворительной. 2) Общепринятая точка зрения на более глубинное положение мафических магм по отношению к кислым не является универсальной. 3) Контрастным эксплозивным извержениям с преобладанием кислого материала, вероятно, предшествует проникновение богатой летучими кислой магмы в менее глубокий очаг основной магмы. Наличие неглубокого очага на пути кислой магмы, вероятно, способствует увеличению эксплозивности извержений. 4) В период покоя между извержениями в верхах очага происходит химическое смешение остатков кислой магмы с основной с образованием гибридных пород.

Литература

1. Eichelberger J.C. (1980) Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs. *Nature* **288**(5790), 446-451.
2. Биндеман И. Н. (1995) Retroградная везикуляция базальтовой магмы в малоглубинных очагах: модель происхождения меланократовых включений в кислых и средних породах. *Петрология* **3**(6), 632-644.
3. Кадик, А. А., Максимов, А. П., Иванов, Б. В. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). М., : Наука, 1986. 158 с.
4. Doubic Ph., 1997. Study of the eruptive products from the three volcanoes in Kamchatka: insides into shallow magma evolution and dynamics. (I. Petrology and eruptive patterns of Stübel cone (Ksudach caldera, Kamchatka)). Ph. D. Thesis. SUNY at Buffalo, USA.
5. Eichelberger J.C., Izbekov P.E. Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky volcano, Kamchatka and Mt. Katmai, Alaska. *Phil.Trans. R. Soc. Lond. A.* **358**, 1465-1485.
6. Hildreth W and Drake RE (1992). Volcan Quizapu, Chilean Andes. *Bull Volcanol* **54**(2): 93-125.
7. Maximov A.P. Physiko-chemical mechanism of deep degassing of the water magmas. *Experiment in Geosciences (in the press)*.
8. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным. В кн.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский, 2001. С.58-74.