

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, МАГМАТИЧЕСКОЙ ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ И ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

С.А. Федотов, Н.А. Жаринов, Л.И. Гонтовая

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail: karetn@list.ru; fedotov@kscnet.ru; nzhar@kscnet.ru

Ключевская группа вулканов (КГВ), находящаяся на Камчатке в северной части Курило-Камчатского вулканического пояса, является одним из наиболее мощных вулканических центров мира. В группе несколько действующих вулканов: базальтовый стратовулкан Ключевской - крупнейший действующий вулкан Евразии, известный андезитовый вулкан Безымянный, Плоский Толбачик с вершинной кальдерой гавайского типа, Толбачинская зона шлаковых конусов и трещинных извержений, вулкан Ушковский. Область конусов КГВ имеет форму эллипса размерами 100*55 км. Вулканы Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик и Толбачинская зона шлаковых конусов протягиваются вдоль его осевой линии. Возраст КГВ несколько сот тысяч лет, объем 6500 км³. Расход магм в КГВ сохранялся в течение последних 50 тыс. лет. В КГВ один только Ключевской извергает в среднем 60*10⁶ т/год базальтов, что равно Σ ювенильных и j годового расхода всех 70 активных вулканов Курило-Камчатского пояса. На вулканах Ключевской, Плоский Толбачик и в Толбачинском долу извергаются базальты, а в середине КГВ на вулкане Безымянный – андезиты [Действующие вулканы..., т. 1, 1991].

С 30-х годов прошлого века КГВ является первым объектом вулканологических исследований в нашей стране. Их начало связано здесь с именами таких выдающихся ученых как академики Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и А.Н. Заварицкий, В.И. Влодавец, член-корреспондент АН СССР Б.И. Пийп, С.И. Набоко. 1 сентября 1935 г. в пос. Ключи была открыта Камчатская вулканологическая станция АН СССР, которая с тех пор ведет непрерывные полезнейшие наблюдения за КГВ. В течение почти 80 лет ведутся исследования вулканов КГВ, их геологического строения, извержений, продуктов, петрологии, геохимии, землетрясений, деформаций, глубинного строения, воздействия на окружающую среду. Фундаментальные научные результаты дало всестороннее изучение крупных извержений. Такими были пароксизмальное вершинное извержение вулкана Ключевской в 1944-1945 гг. [Пийп, 1956], катастрофическое извержение и направленный взрыв вулкана Безымянный в 1955-1956 гг. [Горшков, Богоявленская, 1965], Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. [Большое трещинное..., 1984].

Одним из главных направлений исследований КГВ являются изучение механизма вулканической деятельности и свойств магматической питающей системы КГВ и ее вулканов. Это одна из фундаментальных проблем вулканологии наряду с вопросами петрологии и геохимии. Глубинное строение и магматические очаги под вулканами изучаются методами геологии и геофизики, а свойства магматических питающих систем, механизм извержений и связанные с ними процессы изучаются, главным образом, методами вулканологии, сейсмологии и геодезии [Федотов, 2006]

Первые данные о магматическом очаге Ключевского вулкана были опубликованы Г.С. Горшковым в 1956 г. [Горшков, 1956]. Он нашел по данным об экранировании поперечных волн японских землетрясений, что этот очаг находится в верхней мантии на глубине около 60 км. Затем Г.С. Горшковым была предложена международная программа исследования «корней вулканов». В последующие десятилетия глубинное строение и магматические очаги КГВ изучались методами сейсморазведки, сейсмического просвечивания, сейсмологии, гравиметрии и электромагнитными методами [Токарев, 1966; Вулканизм..., 1977; Аносов, 1978; Балеста, 1981]. Обзор их результатов выходит за пределы данного сообщения. Отметим лишь часть главных из них.

Под Ключевским вулканом обнаружена аномальная, почти вертикальная столбообразная зона поперечником 2 км, поднимающаяся с глубины 50 км. Вероятно, это главный «магмовод» КГВ. Земная кора под КГВ наращивается снизу магмой, подступающей из мантии. Под вулканом Безымянный на глубине 10-20 км имеется андезитовый магматический очаг, соединяющийся с магмоводом базальтового Ключевского вулкана.

Более 30 лет ведется изучение механизма извержений, магматических очагов и питающих каналов КГВ и ее отдельных вулканов по данным вулканологии, сейсмологии, геодезии и математического моделирования [Большое трещинное..., 1984; Федотов и др., 1988; Федотов, 2006; Федотов, 2007].

Важнейшие сведения были получены при всесторонних исследованиях Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), которое происходило с 06.07.1975 до 10.12.1976 г. [Большое трещинное..., 1984; Действующие вулканы..., т. 1, 1991]. Это было сложное крупнейшее базальтовое извержение исторического времени в Курило-Камчатском вулканическом поясе, объем 2.2 км^3 . Сначала в Северном прорыве из новых трещин и конусов, образовавшихся в Толбачинской зоне на расстоянии 18 км от Плоского Толбачика, извергались глубинные магнезиальные базальты. Затем началось проседание вершинной кальдеры Плоского Толбачика и смешение глубинных магнезиальных базальтов с мегаплагиофировыми базальтами, слагающими основание КГВ. С 18.09.1975 г. извержение мегаплагиофировых базальтов продолжалось из трещин и нового конуса Южного прорыва на расстоянии 28 км от Плоского Толбачика, где было излито более половины базальтов БТТИ.

По сейсмологическим данным, подъем глубинных базальтов происходил в течение 10 дней перед извержением с глубины 10-20 км. Из вершинной кальдеры Плоского Толбачика опустилось в магматическую питающую систему 0.35 км^3 мегаплагиофировых базальтов предыдущих извержений. В питающих магматических очагах и каналах происходило смешение двух типов базальтов. По расчетам, объем той части магматической питающей системы КГВ, из которой происходил отток магм во время БТТИ, оценивается величиной $(1.6-4.0) 10^3 \text{ км}^3$. При остановках извержения начинались коровые землетрясения под большей частью КГВ. Это указывало на то, что под всей КГВ находится система взаимосвязанных магматических очагов [Большое трещинное..., 1984].

Наибольшее количество данных получено о механизме деятельности и магматической питающей системе главного вулкана КГВ, Ключевского. Она протягивается вверх от сейсмофокального слоя на глубинах около 160 км до вершины Ключевского вулкана и состоит из пяти частей.

1. Глубины около 160 км под Ключевским вулканом, верхняя часть погружающейся тихоокеанской плиты. Здесь находится вероятный источник летучих и энергии, необходимых для зарождения магм. Тепло, выделяющееся в сейсмогенной зоне при деформациях, может быть достаточным для частичного плавления.

2. Глубины 160-45 км, астеносфера и нижние слои литосферы. Здесь происходит частичное плавление, формирование пикритовых магм, гравитационная конвекция, подъем диапиров и астеносферных магматических колонн. Магматические каналы, питающие извержения, могут протягиваться с глубин 50-60 км до вершинного кратера.

3. Глубины 45-25 км, коромантийные слои. Избыточное давление мантийных магм должно быть максимальным и может достигать 1000-2000 бар. Здесь у подошвы литосферы происходят внедрение и накопление магм в промежуточных магматических очагах, которые сопровождаются множеством слабых длиннопериодных землетрясений. Происходят дифференциация магм и образование магнезиальных базальтов.

4. Глубины 25-5 км, кристаллические слои земной коры. Здесь происходят подъем и дифференциация магм в непрерывных питающих каналах, поднимающихся в верхние слои коры и постройки вулкана. Перед крупными вершинными извержениями наблюдались подъем центра избыточного магматического давления и гипоцентров землетрясений.

5. Глубины 5-0 км, верхние слои земной коры и постройки вулканов. Здесь происходят накопление высокоалюминиевых базальтов, их дегазация, формирование магм вершинных и побочных извержений, внедрение сотен питающих даек и силлов, максимальное количество вулкано-тектонических и вулканических землетрясений. Избыточное магматическое давление может достигать 500 бар. Возможно образование периферических магматических очагов. После крупных вершинных извержений опускания дна кратера достигают 500 м и более.

Свойства этих пяти мантийных и коровых частей магматической питающей системы Ключевского вулкана изучаются более 20 лет [Федотов и др., 1988; Федотов, 1993; Ефимов и др., 1996; Федотов, 2006; Федотов и др., 2007; Федотов и др., 2008].

Дополнительные оценки размеров промежуточного и периферического очагов Ключевского вулкана были получены при новой обработке геодезических данных о

вертикальных смещениях на склонах и подножье вулкана в 1982-2008 гг. Было принято, что деформации на поверхности создаются изменениями эффективного давления в двух центрах, промежуточном и периферическом очагах, глубины которых постоянны и равны 25 и 3 км. Наблюдения выполнялись 17 раз в течение 26 лет. Средние величины объемов промежуточного и периферического магматических очагов оказались равными 156.2 и 30.7 км³, промежуточный очаг по объему примерно в 5 раз больше периферического.

Эти средние величины близки к тем, которые получены другими независимыми способами. Источник магм самого большого побочного извержения Билукай, которое началось 07.02.1938 г. и излило за 13 месяцев 310*10⁶ м³ магнезиальных базальтовых лав, мог иметь объем 160 км³. По тепловым расчетам [Федотов и др., 2006], объем проточного магматического очага на глубине 4 км может достигать 35.3 км³. Объем области гипоцентров слабых землетрясений на глубинах 25-30 км в несколько раз больше объема их скопления на глубинах 0-5 км.

Выполненные расчеты и результаты предыдущих работ [Федотов, Жаринов, 2007] показывают также другие важные свойства магматической питающей системы Ключевского вулкана. Относительные размеры промежуточного очага были наименьшими, а отток магмы из него был наибольшим в критический период 1984-1987 гг., когда жерла и трещины побочных прорывов, поднимавшиеся по склонам конуса вулкана с 1932 г., достигли вершины вулкана. По полученным оценкам, основная часть мантийных магм остается в коромантийном слое и земной коре. Возможно образование крупных интрузий у подошвы земной коры, где избыточное магматическое давление максимально.

Для изучения строения и свойств земной коры и мантии, магматических очагов и магматических питающих систем вулканов под КГВ применяются методы сейсмотомографии. Аномалии скоростей сейсмических волн V_p , V_s и V_p/V_s могут указывать положение объемов пород, обогащенных расплавами, а также застывших магматических очагов и интрузий. Полученные сейсмотомографические данные подтверждают, что глубинный источник вещества и энергии магнообразования находится у верхней границы сейсмофокального слоя, откуда вверх к земной коре сквозь астеносферу протягивается область, обогащенная расплавами. На послойных картах и вертикальных разрезах аномалий скоростей для глубин 0-40 км видно вероятное расположение магматических очагов действующих вулканов, возможных зон перетекания магм и застывших очагов в земной коре под КГВ. Интенсивные аномалии имеются под всей КГВ. Пониженные скорости наблюдаются на глубинах 25-35 и 0-10 км под Ключевским, 20 км под Безымянным и 10-15 км под Плоским Толбачиком [Гонтовая и др., 2004; Хубуная и др., 2007; Федотов и др., 2008].

Ключевская группа вулканов действует и растет в течение сотен тысяч лет. Вместо угасших крупных вулканов появлялись новые вулканы. Это означает, что происходили большие изменения в ее магматической питающей системе, застывали прежние, появлялись новые магматические каналы и очаги. По имеющимся данным, современная магматическая питающая система КГВ состоит из пяти главных частей [Федотов и др., 1988; Федотов, 1993; 2006; Федотов и др., 2007; Федотов и др., 2008]. Отметим ряд ее основных свойств.

1. Глубины около 160 км под КГВ, верхняя часть погружающейся Тихоокеанской плиты.

Здесь находится источник энергии и летучих, необходимых для зарождения магм. Тепло, выделяющееся при деформациях в сейсмогенной зоне, может быть достаточным для частичного плавления.

2. Глубины 160-40 км, астеносфера.

Здесь происходят частичное плавление, формирование пикритовых магм, гравитационная конвекция, подъем диапиров и астеносферных магматических колонн. Магматические каналы, питающие извержения, протягиваются с глубин 50-60 км до вершинного кратера Ключевского вулкана. Возможен также подъем к магматическим очагам Плоского Толбачика и Толбачинской зоны.

3. Глубины 40-25 км, коромантийные слои.

Избыточное давление мантийных магм должно быть максимальным. Здесь у подошвы литосферы происходят внедрение интрузий и накопление магм, в первую очередь, в промежуточном очаге Ключевского вулкана, которое сопровождается множеством слабых длиннопериодных землетрясений. Его объем может превышать 150 км³. Образуются магнезиальные базальты, часть которых достигает земной поверхности при побочных извержениях у основания Ключевского вулкана. Возможно перемещение магм отсюда в другие магматические очаги КГВ.

4. Глубины 25-5 км, земная кора. Здесь происходят подъем магм к Ключевскому вулкану, к другим вулканам и дифференциация магм, находятся коровые магматические очаги андезитового вулкана Безымянный и базальтового вулкана Плоский Толбачик. Эти главные действующие вулканы КГВ, расположенные в ее средней части, протягиваются по разлому вдоль вулканического пояса Камчатки. На глубинах 35-5 км под всей КГВ находится большая сложная система связанных магматических очагов, общий объем которых может превышать 1600 км³.

5. Глубины 5-0 км, верхние слои коры и постройки вулканов над ними. Здесь происходит формирование магм и накопление магм вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана, внедрение из его питающего канала многочисленных даек и силлов. Объем периферических магматических очагов вулканов КГВ на порядок меньше, чем промежуточных.

Изложенные и упомянутые выше сведения дают представление о росте знаний о «корнях» Камчатской группы вулканов, произошедшем за полвека.

Список литературы

Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки М.: Наука, 1978. 123 с.

Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 133 с.

Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 гг., Камчатка) /Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.

Вулканизм и геодинамика // Отв. ред. Г.П. Авдейко, С.А. Федотов. М.: Наука, 1977. 262 с.

Действующие вулканы Камчатки т.1. /Отв. ред. С.А. Федотов и Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. 302 с

Ефимов А.Б., Ершова Т.Я., Федотов С.А. О прорывах магмой питающего канала, образовании даек и других пластовых интрузий под Ключевским вулканом // Вулканология и сейсмология, 1996. № 1. С.3-23.

Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сениюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2004. № 3. С. 3-11.

Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703-705.

Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955-1956 гг.). М.: Наука, 1965. 165 с.

Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом. Тр. Лаб. вулканологии, 1956. Вып. 11. 308 с.

Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949-1963 гг.). М.: Наука, 1966. 116 с.

Федотов С.А. Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология, 1993. № 3. С. 23-45.

Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.

Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И. Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. №2. С.4-42.

Федотов С.А., Жаринов Н.А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986-2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3-31.

Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И., Собисевич А.Л. Вулкан Ключевской (Камчатка): деятельность, магматическая питающая система, сейсмотомография // Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 273-294.

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. 32-54.