

УДК 550.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МИКРО- И МАКРОМАСШТАБАХ

© 2011 г.

О.Э. Мельник, А.А. Бармин, Е.А. Веденеева, Ю.Д. Цветкова

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

melnik@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предложен обзор работ по моделированию вулканических процессов при различных типах извержения. Построенные модели основаны на уравнениях механики многофазных сред, учитывают реальные свойства магматического расплава. Даны объяснения многим наблюдаемым явлениям. Показана связь между тектурой изверженных пород и процессами подъема магмы к поверхности.

Ключевые слова: механика многофазных сред, вулканическое извержение, кристаллизация, вязкая жидкость.

Введение

Вулканическое извержение – один из наиболее разрушительных типов природных катастроф. Важность изучения вулканических извержений методами механики сплошных сред обусловлена отсутствием прямых методов наблюдения процессов, происходящих в земной коре, редкостью крупных вулканических извержений, необходимостью прогноза и определения степени опасности конкретных вулканов. Магма представляет собой объект, обладающий уникальными физическими свойствами – аномально большой переменной вязкостью, наличием растворенного в ней газа, выделяющегося при подъеме, сложными физико-химическими превращениями. При подъеме магмы по каналу в результате резкого падения давления происходит изменение структуры потока от гомогенной жидкости до газозвеси, сопровождающееся нуклеацией, ростом пузырьков, их частичным слиянием и разрушением образовавшейся пены.

Представлен обзор гидродинамических моделей течения магмы в канале вулкана для случая сильновязких газонасыщенных магм, а также моделирование процессов кристаллизации магматического расплава на уровне отдельного кристалла и эволюции популяции кристаллов.

Гидродинамические модели вулканических извержений

На основе законов механики многофазных сред сформулированы модели течения магмы в канале вулкана для различных типов извержения.

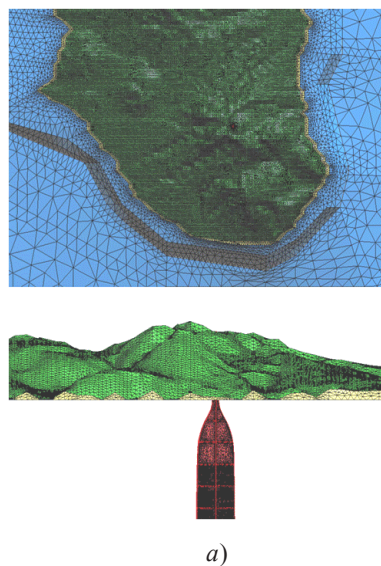
В стационарной квазиодномерной постановке изучена динамика эксплозивного (взрывного) извержения для канала эллиптической формы, расположенного в упругих породах [1]. Показано, что с увеличением горизонтального раскрытия канала (большой полуоси эллипса) извержение прекращается или локализуется при большем давлении в очаге. Наибольшие расходы соответствуют случаю перехода щелевого канала в цилиндрический в приповерхностной области.

Исследована роль внешнего растягивающего тектонического напряжения на динамику трещинного катастрофического эксплозивного извержения. Показано, что с ростом растягивающего напряжения максимально возможное горизонтальное раскрытие канала увеличивается. Существует критическое растягивающее напряжение, при котором канал любого горизонтального раскрытия не будет перекрываться за счет пониженного давления магмы внутри канала. При этом возможны извержения с расходами до 10^{12} кг/с, соответствующие доисторическим суперизвержениям с объемом извергнутого материала более 500 км^3 . Подобные извержения через цилиндрические каналы невозможны. Результаты расчетов хорошо согласуются с геологическими данными.

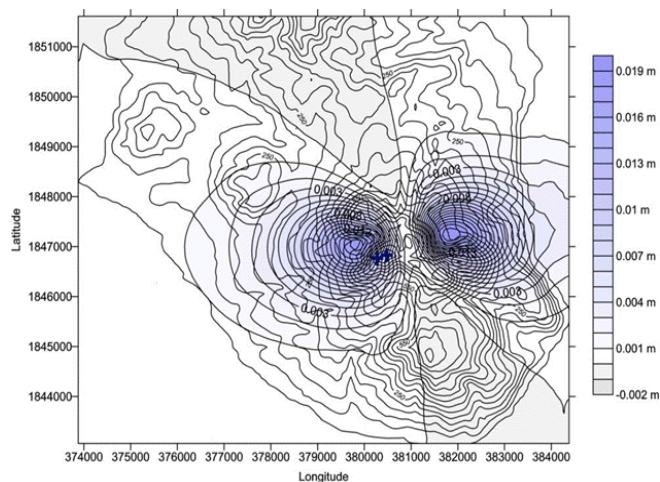
Построена модель течения магмы в канале вулкана при росте лавового купола с учетом значительного изменения вязкости магмы при ее кристаллизации, выделения скрытой теплоты кристаллизации, упругости стенок канала вулкана. Выявлено наличие неоднозначного стационарного решения при фиксированных параметрах в очаге извержения. Показано, что периодические режимы могут возникать как при постоянном дав-

лении в очаге, так и при постоянном расходе магмы, подтекающей из очага в канал, и в более общем случае, учитывающем конечность объема очага, упругость его стенок и сжимаемость магмы. При этом период колебаний и области неустойчивости стационарного решения зависят от типа граничного условия. Показано, что при умеренном притоке магмы в очаг извержения период колебаний определяется упругостью стенок канала, а при большом – деформациями самого очага.

На основе построенной модели интерпретированы данные угломерных измерений на вулкане Суфриер Хиллз на острове Монтсеррат в Карибском море, где обнаружены 5–7 недельные вариации угла наклона вулканической постройки. Рассчитанное по гидродинамической модели распределение давления по каналу вулкана было использовано в качестве граничного условия для решения трехмерной упругой задачи с учетом реальной топографии острова. Полученные в результате расчета поля деформаций на поверхности позволили определить пространственную ориентацию канала, которая совпала с определенным геофизическими методами глобальным разломом, проходящим через остров (рис. 1, где изображена трехмерная модель острова Монтсеррат (а) и поле горизонтальных деформаций на свободной поверхности (б)).



а)



б)

Рис. 1

Кристаллизация магматического расплава

Рассмотрены процессы роста одиночного кристалла плагиоклаза из остывающего магматического расплава [2]. Процесс кристаллизации описывается системой уравнений многокомпонентной диффузии с учетом перекрестных чле-

нов. Скорость роста кристалла и его состав определяются по экспериментальным данным. Результаты численного моделирования показали, что даже при линейном падении температуры кристалл растет неравномерно, периоды роста сменяются периодами растворения. В результате этого в кристалле образуются полосы разных составов. Получена зависимость средней ширины полос от скорости остывания. Получен критерий возникновения зональности в кристаллах плагиоклаза.

Исследована эволюция распределения кристаллов плагиоклаза по размерам при подъеме магмы по каналу вулкана [3]. Построена модель, позволяющая восстановить распределения по глубине площади поперечного сечения канала вулкана, давления, температуры и других параметров на основе формы распределения кристаллов по размерам в изверженных породах при стационарном режиме извержения.

Модель применена к описанию питающей системы вулкана Маунт Ст. Хеленс, США. Рассчитанные средний диаметр канала и глубина очага находятся в хорошем соответствии с оценками, полученными геофизическими и петрологическими методами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-01-00016.

Список литературы

1. Costa A., Melnik O., Sparks R.S.J. // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V. 260, No 1–2. P. 137–151.
2. Горохова Н.В., Мельник О.Э. // *Изв. РАН. МЖГ*. 2010. №5. С. 3–16.
3. Melnik O.E., Blundy J.D., Rust A.C., Muir D.D. // *Geology*. 2011 (в печати).

MATHEMATICAL SIMULATION OF VOLCANIC PROCESSES ON MICRO- AND MACRO-SCALES

O.E. Melnik, A.A. Barmin, E.A. Vedeneva, Yu.D. Tsvetkova

The paper reviews simulations of volcanic processes for various types of eruptions. The developed models are based on the equations of multiphase systems accounting for realistic properties of magmatic melts. Explanations of the observed phenomena are presented. A correlation between the textures of erupted products and magma ascent dynamics is shown.

Keywords: mechanics of multiphase systems, volcanic eruption, crystallization, viscous fluid.