

АНАЛИЗ ИНЖЕКЦИИ МАГМЫ ПОД КОРЯКСКИМ ВУЛКАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кирюхин А.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Аннотация

Для геомеханического анализа инъекции даек под Корякским вулканом в период активности 2008-2009 гг. использована гидрогеомеханическая модель (CFRAC). Предметом исследования являлось выяснение масштабов сейсмичности при инъекции магмы в существующие системы трещин. В рассматриваемой модели инъекция магмы осуществлялась в трещину с углом падения 60 град., размерами 2 x 2 км² на глубине 6 км (-3 км абс.). Расход инъекции магмы в трещину задан 2000 кг/с при допустимом максимальном давлении 200 МПа, продолжительность инъекции 1 сут. Начальное давление флюида в трещине задано 45 МПа, плотность магмы 2800 кг/м³, вязкость от 0.2 Па·с (базальтовая магма) до 200 Па·с (андезитовая магма). Начальное геомеханическое состояние определено по результатам предшествующих исследований. Результаты моделирования показывают возможность раскрытия трещины до 0.06 м, сдвиговых деформаций с генерацией N 10 - N 100 микроземлетрясений с магнитудой до 4.8.

Введение

В данной работе инъекции магмы в трещиноватую среду под активными вулканами рассматриваются по аналогии с инъекцией флюидов в скважины с последующим гидроразрывом и активизацией трещин во вмещающих горных породах. Эта аналогия также поддерживается наблюдениями, изложенными в работе Sigmundsson et al. (2015), в которой описываются процессы инъекции магмы под вулканом центрального типа Barparbunga (Исландия), происшедшего в августе 2014 г. и сопровождавшееся формированием даек общей протяженностью 50 км. Указанная система даек с объемом 0.6 км³ была сформирована за 22 сут., она включала 11 плоско-ориентированных зон кластеров землетрясений (количество землетрясений в каждом кластере составляло от 57 до 1181, магнитуды некоторых из землетрясений превышали 5).

Исходные данные

Для определения концептуальной гидромеханической модели инъекции магмы под Корякским вулканом использованы данные по локальной сейсмичности КФ ГС РАН полученные в период 2008-2009 гг. Парогазовое вершинное извержение Корякского вулкана 2008–2009 гг сопровождалось 153-мя плоско-ориентированными кластерами землетрясений, которые интерпретируются как зоны инъекции магмы в виде даек и силлов. Инъекции магмы сопровождались формированием преимущественно даек субмеридионального простирания с углами падения более 50°.

Концептуальная модель

Рассматривается упрощенная модель, состоящая из одиночной трещины, в которую внедряется дайка (рис.1). Предполагается нормальное геомеханическое состояние под Корякским вулканом, при этом вертикальный стресс S_v является максимальным, максимальный горизонтальный стресс SH_{max} ориентирован в меридиональном направлении, минимальный горизонтальный стресс Sh_{min} действует в широтном направлении (Zoback, 2007).

Определение напряженного состояния

Вертикальный стресс S_v на глубине $z_0=6000$ м (≈ -3000 м абс) оценивается как $S_v = \int_0^{z_0} \rho \cdot g \cdot dz = (2200 \cdot 9.81 \cdot 4000 + 2700 \cdot 9.81 \cdot 2000) = 139.3$ МПа (где ρ – плотность горных пород принимается 2200 кг/м³ для верхней части разреза (вулканогенный бассейн) и 2700 кг/м³ для фундамента вулкана; $Sh_{min} = P_f + (S_v - P_f) / ((\mu^2 + 1)^{0.5} + \mu) = 68.4$ МПа (где P_f – флюидное давление принимается 35 МПа по данным равномерных наблюдений в скважинах, коэффициент трения $\mu=0.6$); SH_{max} приблизительно оценивается как среднее значение $(S_v + Sh_{min})/2 = 103.9$ МПа.

С учетом вышесказанного, тензор эффективных напряжений под Корякским вулканом в диапазоне глубин от -5000 м абс до 1000 м абс определяется в географической системе координат X , Y , Z (X – направление на восток, Y – направление на север, Z – направление вверх) следующим образом:

$$S_g = \begin{pmatrix} Sh_{min} - Pf & 0 & 0 \\ 0 & SH_{max} - Pf & 0 \\ 0 & 0 & Sv - Pf \end{pmatrix} \quad (1)$$

CFRAC (программа для гидромеханического моделирования)

Программа CFRAC осуществляет решение объединенной системы гидромеханических уравнений для потоков и деформаций в дискретной системе трещин (McClure, 2014; McClure and Horne, 2013). Уравнения для потока (2) в трещине и механических деформаций (3) трещины записываются следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_{flux} e) + S_a \quad (2)$$

где S_a определяет массовые источники на единицу площади трещины, t – время, E – поровое раскрытие трещины (поровый объем на единицу площади трещины), ρ – плотность флюида, q_{flux} – массовый поток (массовый расход по Дарси на площадь сечения потока), и e – гидравлическое раскрытие трещины (эффективное раскрытие для потока в трещине), и

$$\nabla^T T_s = 0 \quad (3)$$

где T_s тензор напряжений.

Уравнение для потока (2) решается методом конечных элементов, уравнение для деформаций (3) решается методом граничных элементов для квазистатических условий равновесия. Флюидный поток предполагается изотермическим, термоупругими эффектами пренебрегается. Элементы трещины в одиночной двумерной трещине могут раскрываться и скользить. Горные породы, вмещающие трещину, принимаются непроницаемыми, таким образом потоки флюида определяются только в открытом пространстве трещины. Для моделирования возникновения землетрясений, разрывов и фиксации используется статическое/динамическое описание трения в трещине.

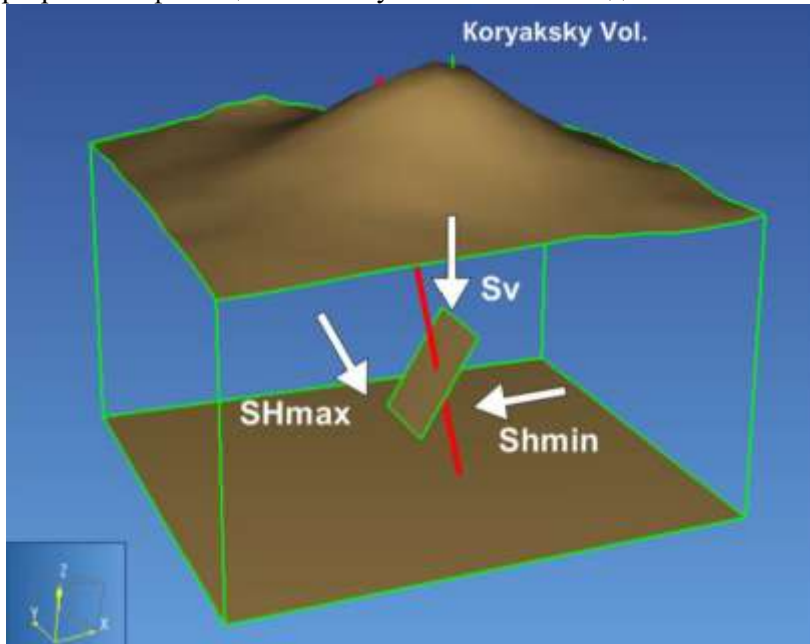


Рис. 1 Концептуальная модель инъекции магмы под активным вулканом. S_v – вертикальный стресс, SH_{max} – максимальный горизонтальный стресс, Sh_{min} – минимальный горизонтальный стресс.

Сборка CFRAC-модели

На модели рассматривается инъекция дайки в трещину с углом падения 60° и размерами 2 км (по направлению падения) на 2 км (по направлению простиранья), центрированную на глубине 6000 м (или -3000 м абс) под Корякским вулканом. Принимаются также следующие условия: инъекция магмы осуществляется в течение 1 сут., расход инъекции магмы 2000 кг/с, максимальное давление инъекции 200 МПа, плотность магмы 2800 кг/м³. Вязкость магмы задавалась на модели в диапазоне

от 0.2 Па·с (базальтовая магма) до 200 Па·с (андезитовая магма). Начальное давление магмы задано 45 МПа.

Тензор эффективного стресса S_f в системе координат плоскости трещины (X2 – направление падения, Y2 – направление простирания, Z2 – нормаль вверх от плоскости трещины) рассчитывается по данным известного тензора в географической системе координат с использованием матрицы преобразования координат:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) & -\cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) & -\sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

- где α – угол простирания, β – угол падения. Соответственно:

$$S_f = A \cdot S_g \cdot A^T, \quad (5)$$

- где A^T транспонированная матрица A . Таким образом S_f определяется (единицы измерения МПа):

$$S_f = \begin{pmatrix} 86.6 & 0 & -30.7 \\ 0 & 68.9 & 0 \\ -30.7 & 0 & 51.1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

В терминах программы CFRAC: $S_{xx}=86.6$ МПа, $S_{yy}=68.9$ МПа, $S_{zz}=51.1$ МПа, $S_{zx}=-30.7$ МПа, $S_{zy}=0$. Поскольку в программу CFRAC гравитационные члены не включены в явном виде, то необходимо определить тренды эффективных стрессов в системе координат трещины: $\frac{\partial S_{xx}}{\partial z} = 12.0$ МПа/км, $\frac{\partial S_{yy}}{\partial z} = 9.5$ МПа/км, $\frac{\partial S_{zz}}{\partial z} = 7.1$ МПа/км, $\frac{\partial S_{zx}}{\partial z} = -4.2$ МПа/км. Указанные выше градиенты стрессов рассчитывались на основе выражения для тензора стресса (5) с использованием приращений dZ и плотности воды для флюидного давления. Если предположить что контроль гидростатического давления осуществляется магмой, то тренды эффективных давлений в системе координат трещины составят: $\frac{\partial S_{xx}}{\partial z} = -0.7$ МПа/км, $\frac{\partial S_{yy}}{\partial z} = -0.6$ МПа/км, $\frac{\partial S_{zz}}{\partial z} = -0.4$ МПа/км, $\frac{\partial S_{zx}}{\partial z} = 0.2$ МПа/км.

Результаты CFRAC-моделирования

Было выполнено моделирование в диапазоне вязкости от 0.2 до 2000 Па·с для двух вариантов тренда эффективного стресса (по гидростатике магмы и воды), всего 8 вариантов. Получено следующие распределения модельных параметров в трещине спустя 1 сут. после начала инъекции магмы: флюидное давление и нормальный эффективный стресс, векторы смещений и скорости смещений, раскрытие трещины. В частности, раскрывшаяся часть трещины характеризуется флюидным давлением от 85 до 91 МПа (избыточное давление от 40 до 46 МПа), раскрытие трещины до 0.06 м. Эффективные напряжения снижаются до нуля в зоне раскрытия трещины. Верхняя стенка трещины соскальзывает вниз относительно нижней стенки (режим нормального разлома). Смещение достигает 2.3 м в раскрытой части трещины. В случае гидростатического взвешивания «по воде» наблюдается преимущественная тенденция раскрытия центральной части трещины, в то время как при гидростатическом взвешивании «по магме» – раскрывается верхняя часть трещины.

Программа CFRAC определяет пороговое значение сдвиговых скоростей деформации для генерации землетрясений, в этот момент модельный элемент в котором достигнуто указанное условие интерпретируется как начальная точка разрыва, который заканчивается когда скорости сдвиговых деформаций падают ниже порогового значения. Параметры землетрясений идентифицируются таким способом внутри программы CFRAC (времена, координаты гипоцентров, сейсмические моменты и магнитуды, площади разрывов) и записываются в результирующие файлы. Сейсмический момент M_0 оценивается по данным сдвиговых деформаций следующим образом: $M_0 = G \cdot \int slip \, dA$, где G – модуль сдвига, A – площадь сдвига. Далее рассчитывается магнитуда M_w : $M_w = \lg(M_0)/1.5 - 6.06$ (где M_0 выражается в Н·м). CFRAC-моделирование с использованием статической/динамической опции (коэффициент трения $\mu_{static}=0.6$ до начала землетрясения, резко падает до $\mu_{dynamic}=0.55$ после начала землетрясения) показывает, что сдвиговые смещения во время инъекции магмы являются триггерами множества землетрясений в различное время и на различных расстояниях от точки инъекции, магнитуда таких землетрясений достигает 4.8 (Рис. 2).

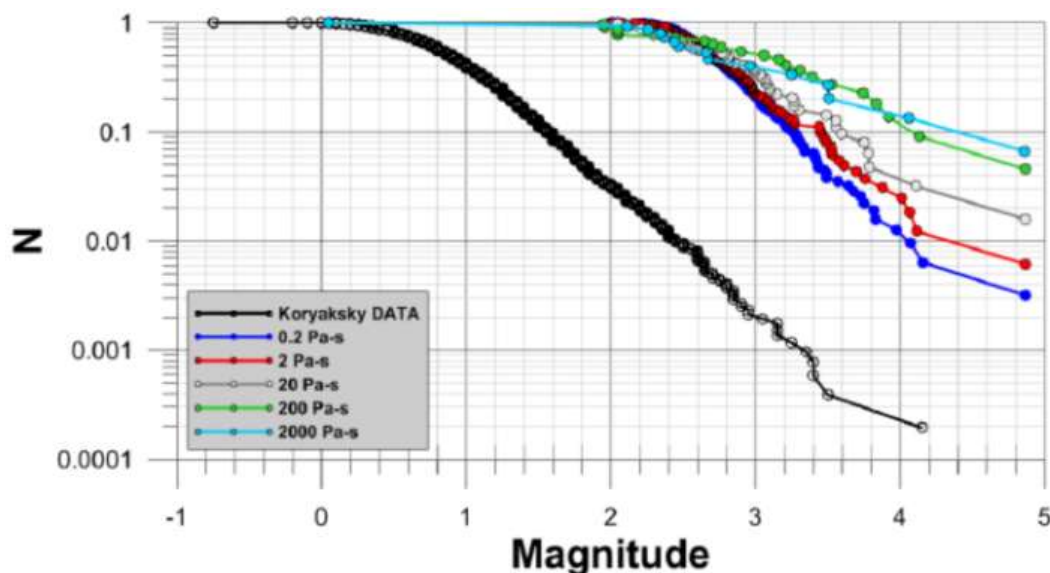


Рис. 2 Диаграмма Гутенберга-Рихтера для Корякского вулкана: данные по сейсмичности 2008-2009 гг (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и результаты CFRAC-моделирования (гидростатическое взвешивание «по воде»).

Заключение

Выполнено CFRAC-моделирование инъекции магмы в трещину в условиях характерных для фундамента Корякского вулкана (режим нормальных разломов, угол падения 60° , размеры $2 \times 2 \text{ км}^2$, глубина – 4 км ниже уровня моря). Результаты моделирования при расходе магмы 2000 кг/с в течение 1 сут. показывают: раскрытие трещины до 0.06 м, сдвиговые деформации с генерацией от десятков до первых сотен землетрясений с магнитудой до 4.8. Таким образом доказано, что плоско-ориентированные кластеры землетрясений под активными вулканами могут указывать на процессы магматического фракинга или инъекции даек. Тем не менее, различная статистика зарегистрированных (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и модельных землетрясений (Рис. 2) указывает на необходимость изучения дополнительных сценариев инъекции магмы под активными вулканами, включая режимы с изменяющимся во времени расходом инъекции магмы и другие возможные варианты.

Автор выражает признательность Dr. M. McClure и Dr. J. Norbeck за полезные замечания и комментарии. Работа выполнялась при поддержке РНФ по проекту # 16-17-10008.

Список литературы

1. Kiryukhin A.V., Fedotov S.A., and Kiryukhin P.A. A Geomechanical Interpretation of the Local Seismicity Related to Eruptions and Renewed Activity on Tolbachik, Koryakskii, and Avacha Volcanoes, Kamchatka, in 2008–2012, *Journal of Volcanology and Seismology*, 10(5), (2016), 275–291.
2. Kiryukhin A., Norbeck J. Analysis of Magma Injection Beneath an Active Volcano Using a Hydromechanical Numerical Model PROCEEDINGS, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 13-15, 2017, p.740-747.
3. McClure, M.W. CFRAC (version 1.2) Complex Fracturing Research Code User's Guide (version 20), December, (2014).
4. Sigmundsson, F., Hooper, A., Hreinsdottir, S., et al. Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Barrparbunga volcanic system, Iceland, *Nature*, 2015, vol. 517, pp. 191–194. doi 10.1038/nature14.
5. Zoback M.D. *Reservoir Geomechanics*, Cambridge University Press, (2007), 448 p.