

## **Моделирование термогидродинамических процессов в конусе Авачинского вулкана**

**Черных Е.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О.**

### **Modeling of thermohydrodynamic processes in the cone of Avachinsky volcano**

**Chernykh E.V., Kiryukhin A.V., Usacheva O.O.**

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

*e-mail: jenia.chev@yandex.ru*

Магмо-гидротермальная активность вулканов сопровождается гидротермальными взрывами, которые могут приводить к трагическим последствиям. Для прогноза предельного возрастания давления под лавовой пробкой в кратере Авачинского вулкана до его извержения оценивается тепловой эффект инъекций магмы в конус вулкана с применением термогидродинамического TOUGH2-моделирования.

**Введение.** Цель данного исследования – анализ термогидродинамических моделей для прогноза давления пара, при котором может произойти разрушение лавовой пробки Авачинского вулкана по принципу гидротермального взрыва. Тема актуальна в связи с активным посещением вулкана (2-3 тыс. чел/год).

Под гидротермальным взрывом (фреатическим извержением, магмо-фреатическим извержением и т.п.) понимается процесс разрушения верхнего водоупора (в частности это может быть лавовая пробка) при нарастании давления пара на его подошве выше величины горного давления. Причиной гидротермального взрыва может быть контакт магмы с водой с последующим ее преобразованием из жидкой фазы в пар. Гидростатический градиент по пару на 2-3 порядка меньше чем у воды, что приводит к передаче давления пара по вертикали от зоны нагрева до пробки без существенного уменьшения.

Примеры исторических гидротермальных извержений описаны в многочисленных публикациях [8-10, 13, 14]. Фреатическое извержение вулкана Онтакэ в Японии 27.09.2014 г. произошло спустя несколько месяцев после магматической активности вулкана. Извержение было внезапным, началось с сухих пирокластических плотных потоков, с последующим камнепадом и выпадением тефры с дождем, истечением из кратера мутной горячей воды; число жертв составило 64 человека [9, 13, 14]. На вулкане Белый остров (Новая Зеландия) 09.12.2019 г. неожиданное фреатическое извержение привело к гибели 21 человека и еще 26 получили ранения [9]. Сель и оползень в Долине гейзеров в 2007 и 2014 гг. [10, 11] и обвал в кратере Мутновского вулкана в 2021 г. по счастливой случайности обошлись без человеческих жертв [6].

**Активность и геологическое строение конуса Авачинского вулкана.** Молодой конус Авачинского вулкана начал формироваться 3800 лет тому назад [3], он сложен лавовыми потоками андезитов и базальтов, а также шлаковым материалом. Внутренняя часть конуса насыщена дайками и силлами, формирование которых продолжается в настоящее время (рис. 1). Водное питание осуществляется по всей поверхности конуса преимущественно в летний период за счет таяния снежников и ледников, а также жидких атмосферных осадков.

Сильные исторические извержения Молодого конуса Авачинского вулкана повторялись в среднем каждые 42 года [7]. С 1737 г. зафиксировано 15 таких событий [3-5]. В 1945 г. после сильного эксплозивного извержения на вулкане образовался кратер диаметром около 250 м и глубиной 170 м. После следующего извержения в январе 1991 г. в кратере образовалась мощная лавовая «пробка» (рис. 1) объемом  $8.3 \times 10^6 \text{ м}^3$  [4]. В октябре 2001 г., во время следующей активизации, образовалась трещина, пересекающая лавовую «пробку» в СЗ-ЮВ направлении [6].

Тепловая мощность фумарол Авачинского вулкана оценивается по формулам дымовых труб [7] в среднем 60 МВт (1981 г., 4 замера) и 30 МВт (2023 г., 3 замера). По

данным газогидрохимического опробования западной фумаролы [1] и восточной фумаролы [2], газовый состав – азотно-углекислый с метаном, температура от 91 до 166 °С (Западная) и от 570 до 626 °С (Восточная), по изотопному составу вода имеет смешанное метеорно-магматическое происхождение, CO<sub>2</sub> – магматического происхождения [1, 12].

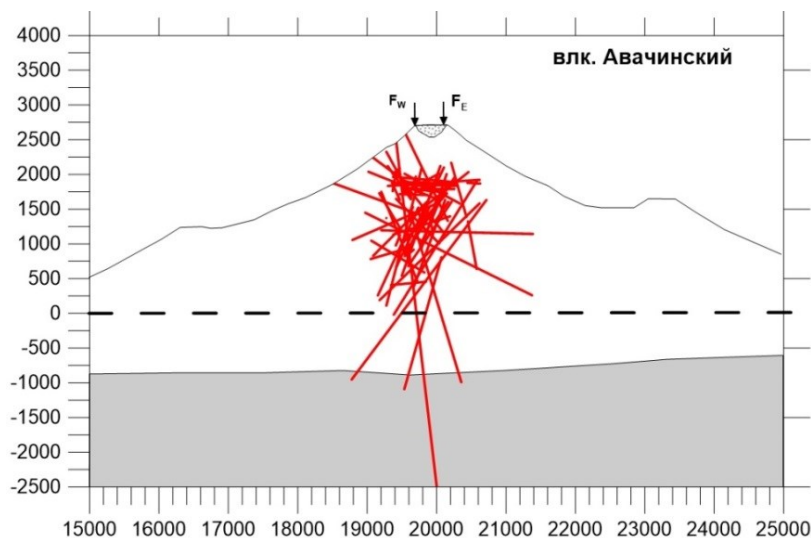


Рис. 1. Вертикальный разрез постройки Авачинского вулкана в направлении С3-ЮВ.

F<sub>W</sub> – западная фумарола, F<sub>E</sub> – восточная фумарола; красные линии – дайки и силлы, определенные Frac-Digger методом ( $\delta_t = 1$  сут.;  $\delta_r = 6$  км;  $\delta_z = 200$  м;  $N \geq 6$  [1]).

Магматическая активность в период с 2000 по 2023 гг. оценивается Frac-Digger методом [1], за рассматриваемый период в постройке Авачинского вулкана выявлено 72 дайки и 14 силлов, преимущественно в диапазоне глубин +1500-2000 м абс. (рис. 1).

**Описание термогидродинамической модели.** Для оценки термогидродинамических условий в конусе Авачинского вулкана использована программа TOUGH2 с модулем состояния EOS1, а для визуализации результатов моделирования использовалось программное обеспечение PetraSim 5.2.

**Сборка модели.** Геометрия модели определена для описания процессов в основании конуса в диапазоне от 1500 до 2000 м абс., размеры модели в плане 2.2×2.2 км. Вычислительная сетка 2D со следующими параметрами разбиения:  $\Delta X = 200$  м ( $NX = 11$ )  $\Delta Y = 200$  м ( $NY = 11$ ), общее количество элементов модели – 121. Высота модели  $\Delta Z = 500$  м ( $NZ = 1$ ) (рис. 2).

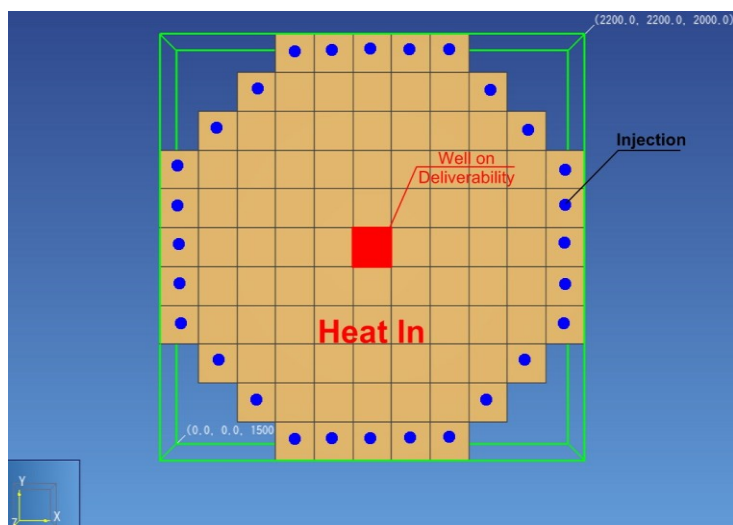


Рис. 2. Геометрия области моделирования, условия теплового и водного питания.

Начальные условия и фильтрационно-емкостные свойства определены следующим образом. Плотность горных пород 2700 кг/м<sup>3</sup>, пористость – 0.1,

проницаемость  $10^{-13} \text{ м}^2$ . Начальные условия: температура  $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , газонасыщение  $S_g = 0.5$ , давление  $P = 1 \text{ бар}$ .

**Источники и стоки.** По периферии модели (рис. 2) задан приток метеорных вод ( $1.8 \text{ кг/с}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), во внутренней части модели заданы источники тепла (силлы и дайки) –  $5.0 \text{ МВт}$  в каждом из элементов модели (суммарно  $340 \text{ МВт}$ ). В центре модели определена разгрузка (фумаролы) – элемент модели #61 (well on deliverability)  $PI = 1 \times 10^{-10} \text{ м}^3$ ,  $P = 1 \text{ бар}$ .

**Результаты моделирования.** Выполнено TOUGH2-моделирование для оценки динамики изменения температуры, давления и насыщения газовой фазы на кровле модельного геотермального резервуара (подошва лавовой пробки в кратере Авачинского вулкана) в течение 100 лет.

Полученная в результате моделирования (100 лет) прогнозная температура на подошве лавовой пробки в центральной части конуса Авачинского вулкана оценивается от  $286$  до  $292 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление – от  $71$  до  $77 \text{ бар}$ , насыщение газовой фазы – от  $0.29$  до  $0.43$  (рис. 3). Таким образом, результаты моделирования показывают возможность разрушения верхнего водоупора модельного геотермального резервуара мощностью  $170 \text{ м}$  при плотности слагающих его горных пород  $2700 \text{ кг/м}^3$  (горное давление  $2700 \times 170 \times 9.81 / 10000 = 45 \text{ бар}$ ) через  $87 \text{ лет}$  (рис. 3).

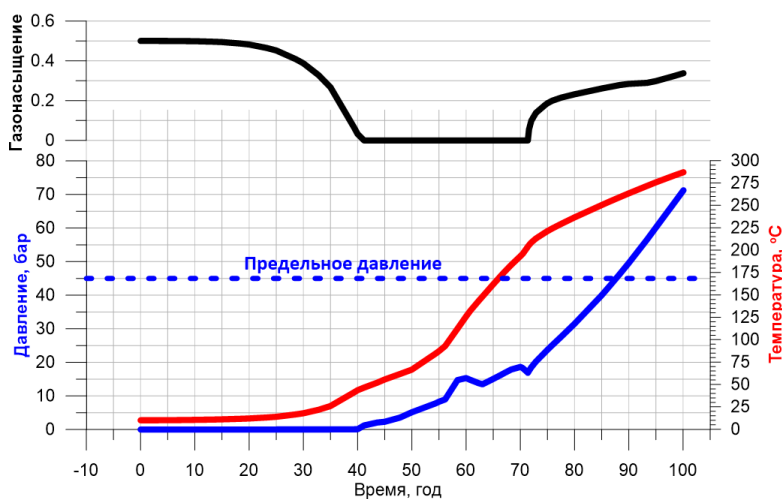


Рис. 3. Прогнозируемое изменение температуры, давления и насыщения газовой фазы модельного геотермального резервуара (центр подошвы лавовой пробки конуса Авачинского вулкана). Давление – синяя линия, температура – красная линия, газонасыщение – черная линия.

### Обсуждение результатов и выводы:

1. Результаты моделирования показывают возможность гидротермального взрыва с разрушением лавовой пробки конуса Авачинского вулкана в течение 87 лет при заданных на модели условиях теплового и водного питания.

2. Источники теплового и водного питания, заданные на рассматриваемой модели, определены как постоянные величины, значения которых нуждаются в более глубоком обосновании. Кроме того, водное питание имеет сезонный характер, а тепловое зависит от режима магматической деятельности. Присутствие неконденсирующихся газов (НКГ:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) может значительно ускорить процесс разрушения лавовой пробки. При этом увеличение доли НКГ может сопровождаться понижением температуры на режимных фумаролах.

3. Применяемый инструмент TOUGH2-моделирования может быть значительно усовершенствован и приближен к условиям модельного объекта. В связи с этим, задачами дальнейших исследований являются: (1) 3D-геометризация конуса Авачинского вулкана в диапазоне отметок выше  $1500 \text{ м}$  абс. и распределенной разгрузки фумарол; (2) применение модулей состояния флюидов EOS2 (с учетом  $\text{CO}_2$ ), EOS3 (с учетом  $\text{N}_2$ ), EOS1-sc (расширение диапазона модельных температур до  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ); (3) для калибровки модели и оценки чувствительности оцениваемых параметров к исходным данным будут применены методы инверсионного iTOUGH2-

моделирования с использованием в качестве исходных данных значений тепловой разгрузки (фумаролы) и притока/аккумуляции магмы в конусе Авачинского вулкана по сейсмическим данным.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>.

Авторы выражают признательность зав. Лаборатории геодезии и дистанционных методов исследований ИВиС ДВО РАН И.К. Миронову за предоставление актуальной цифровой карты кратера, С.А. Миронову, Н.Б. Журавлеву, А.В. Сокоренко, И.А. Нуждаеву – за предоставление видеоматериалов кратера.

### Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. *Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М.* Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013-2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 21-32.
3. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. I (1737-1909 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 13-27.
4. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926-1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3-23.
5. *Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеньюков С.Л.* Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79-80.
6. *Поляков А.Ю., Усачева О.О., Кирюхин А.В. и др.* Магматическая активность Мутновского вулкана в 2021 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30-31 марта 2022 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 66-69.
7. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 3-28.
8. *Browne P.R.L., Lawless J.V.* Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // Earth-Science Reviews. 2001. V. 52. P. 299-331.
9. *Eichelberger J., Kiryukhin A., Mollo S. et al.* Exploring and Modeling the Magma-Hydrothermal Regime // Geosciences. 2020. V. 10. № 6. Art. 234. DOI: 10.3390/geosciences10060234
10. *Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. № 9. P. 1753-1766. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
11. *Kiryukhin A.V., Sergeeva A.V., Usacheva O.O.* Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geysers reservoir (Valley of Geysers, Kamchatka) // Geothermics. 2023. V. 115. Art. 102808. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102808
12. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652.
13. *Oikawa T., Yoshimoto M., Nakada S. et al.* Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. Art. 79. DOI: 10.1186/s40623-016-0458-5
14. *Uchida N.* Effects of extreme rainfall on phreatic eruptions: A case study of Mt. Ontake in Japan // EarthArXiv. 2023. DOI: 10.31223/X58D4J