

## ОТ ГЕЙЗЕРА К ВУЛКАНУ: ОБ УНИВЕРСАЛЬНОМ МЕХАНИЗМЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ И ЕГО ВЕРИФИКАЦИИ

*Нечаев А.М.*

*МГУ им. М.В.Ломоносова, Географический ф-т, Москва, [and.nechayev@gmail.com](mailto:and.nechayev@gmail.com)*

### Введение

Современные научные представления о структуре земного шара базируются на том, что твердая оболочка Земли – земная кора – образовалась вследствие остывания ювенильного магматического расплава, который до сих пор находится на глубинах в несколько десятков километров и время от времени прорывается на поверхность земли в результате вулканических извержений. Вопрос о природе и механизме этих извержений пока остается открытым. Существует немало теорий вулканизма [1], но они пока полностью не удовлетворяют научное сообщество. Разнообразие типов вулканов создает простор для научной мысли, однако потребность в простом, физически ясном и «универсальном» механизме вулканического извержения несколько не уменьшается. Возможно, знание подобного механизма (если он, действительно, существует) позволило бы уверенно предсказывать извержения с катастрофическими последствиями. По нашему мнению, на роль подобного механизма мог бы претендовать предложенный и проанализированный в работах [2-3] физический механизм неустойчивости контактирующих объемов жидкости и газа, названный в [4] GLI (Gas-Liquid-Imbalance)-механизмом.

Суть этого механизма заключается в следующем. Если жидкость, заполняющая до краев резервуар (например, вертикальный канал) с твердыми стенками, имеет контакт на глубине  $H$  с замкнутым объемом газа, то их равновесие становится неустойчивым, когда объем газа  $V$  превышает критическую величину  $V^{cr}$ :

$$V^{cr} = \gamma S(H + p_0 / \rho g) \quad (1)$$

где  $S$  – сечение канала в области контакта,  $\gamma$  – коэффициент адиабаты для данного газа,  $\rho$  – плотность жидкости,  $p_0$  – атмосферное давление,  $g$  – ускорение силы тяжести.

Если  $V > V^{cr}$ , то при расширении газа в область канала (и удалении из канала соответствующего объема жидкости), давление в газовом объеме будет оставаться больше гидростатического давления жидкости, в зоне контакта возникнет нарастающий перепад давления, и столб жидкости начнет извергаться под давлением газа. Критическое условие (1) не зависит от формы канала и наличия в нем расширений. Предполагается, что он несет ответственность как за извержения гейзеров (жидкость – вода, газ – водяной пар) [2,3], так и за извержения вулканов (жидкость – магма, газы – водяной пар, углекислота и др.) [4-6].

### Эмпирическая верификация GLI-механизма.

Были осуществлены два демонстрационных эксперимента: для имитации «холодного» гейзера, когда в пластиковый бак – аналог подземной камеры – насосом подавался воздух, и «горячего», когда в камере из термостойкого стекла образовывался пар вследствие кипения воды.

В первом случае вода из бака объемом 100 литров с помощью автомобильного насоса выдавливалась через шланг в 20-литровую бутылку, размещенную на четырехметровой высоте (Рис.1). Бак служил аналогом камеры, а бутылка – расширения канала. Максимальный объем воздуха, нагнетаемого в бак, зависел от высоты патрубка, к которому присоединялся шланг.

При нижнем положении патрубка этот объем намного превышал критический объем, рассчитанный по формуле (1) и равный 6 литрам. В этом случае истечение воды из бутылки резко ускорялось (начиналось «извержение»), как только воздух из бака поступал в шланг. Важно отметить, что процесс извержения воды из бутылки был самоподдерживающимся, так как насос, нагнетающий воздух в бак, в это время был отключен. Если шланг присоединялся к верхним патрубкам, то извержения (ускорения истечения воды из бутылки) не наблюдалось, так как объем воздуха в баке в этих случаях был меньше критического.



Рис.1 Установка для демонстрации механизма извержения: бак с водой и патрубками. Нижний патрубок соединен с пластиковой бутылкой, в верхний насосом подается воздух. На фото сверху справа: вода из бака поступает в бутылку и вытекает через верхнее отверстие со скоростью подачи воздуха в бак (воздух еще не проник в шланг). На фото справа: скорость истечения воды из бутылки резко увеличивается, когда воздух из бака начинает поступать в шланг (извержение есть, так как объем воздуха в баке превышает критический объем).

«Горячий» гейзер был промоделирован с помощью колбы из боросиликатного стекла. Колба имевшая заглушенную горловину и патрубок в 2-х см от плоского дна, размещалась на электроплитке, которая нагревала воду в колбе до температуры кипения. Силиконовая трубка соединяла патрубок колбы с поддоном, установленным на верхней полке стеллажа (Рис.2). Объем колбы был равен 14 литрам, диаметр трубки – 10 мм, расстояние между электроплиткой и верхней полкой стеллажа – 1,6 метра. Критический объем для данной конфигурации составлял 1,2 литра. Поэтому, как только пар, вытолкнув воду из колбы в шланг и поддон, проникал в патрубок, происходило маленькое «извержение» в виде выброса воды из трубки на высоту 30 см (Рис.2).



Рис.2 Установка для имитации «горячего» гейзера. Стеллаж с поддоном и стеклянной колбой, стоящей на электроплите. Вверху: выброс воды из трубки во время «извержения». Справа – колба с патрубком и герметично закрытой горловиной. Хула-хуп и смартфон – для масштаба.



### Гейзеры и их предполагаемые питающие системы.

В природных объектах, чтобы подняться на поверхность земли и извергнуться, жидкость (вода в гейзерах, магма в вулканах) нуждается в дополнительном давлении, избыточном по отношению к литостатическому. Это давление может обеспечивать газ, появляющийся в жидкости вследствие ее декомпрессии при подъеме к поверхности: перегретая вода «вскипает» водяным паром, магма освобождается от растворенных в ней различных газов. Если пузырьки газа не могут расшириться или выйти наружу, они сохраняют свое давление, соответствующее глубине образования, и переносят его вверх, поднимаясь внутри жидкости и ее скоплений под действием архимедовой силы. Появившееся таким образом избыточное давление облегчает дальнейший подъем жидкости, вызывая, например, растрескивание окружающей породы. В случае гейзеров водяной пар, выделившийся из перегретой воды при ее подъеме, может скапливаться под сводом подземных



Рис.3 Возможная питающая система гейзера с камерой, где скапливается водяной пар, и расширением канала. Слева: стадия наполнения гейзера; справа: начало извержения, когда пар проник в канал и вода достигла поверхности.

камер-ловушек (Рис.3), постепенно выдавливая воду из камеры в канал, его расширения и далее на поверхность земли (стадия излива).

Если объем пара в камере превышает критический объем (1), то в момент проникновения пара в канал (Рис.3, справа) начинается извержение, которое может идти либо с полным выбросом всей воды и последующей стадией парения (выходом пара из камеры), либо с прекращением фонтанирования без стадии парения, если давление пара за счет его расширения в канал упадет ниже давления вышележащего гидростатического столба воды.

Показательным примером верификации GLI-механизма является объяснение необычного поведения гейзера BeeHive (Пчелиный Улей) в Йеллоустонском Национальном парке (США). Этот гейзер известен тем, что за 10-15 минут до его основного извержения начинает извергаться маленький фонтанчик из отверстия в нескольких метрах от главного грифона гейзера. Его называют Индикатором. Подобное «парадоксальное» поведение гейзера достаточно легко объясняет GLI-механизм с предполагаемой структурой гейзера, изображенной на Рис.4. Вначале пар в камере достигает канала 1 и начинается извержение Индикатора. Поскольку этот канал, вероятно, очень узкий, и скорость выброса воды мала (фонтан невысокий), извержение Индикатора не успевает закончиться, пока пар в камере не достигнет основного канала 2 и не начнется главное извержение гейзера. Таким образом, давление пара в камере поддерживается на высоком уровне (оба канала заполнены водой) и оба фонтана работают одновременно.

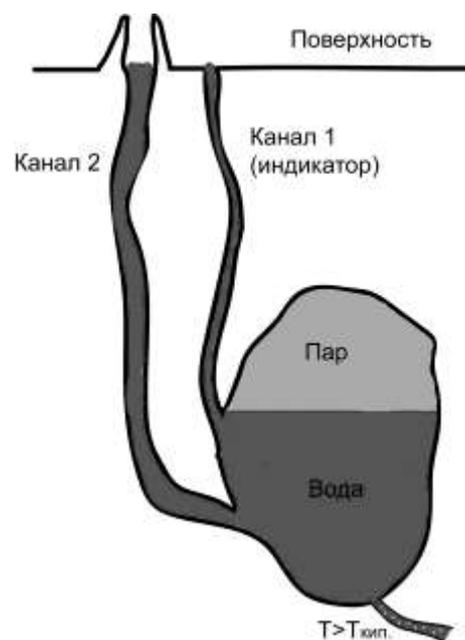


Рис.4 Предполагаемая структура гейзера BeeHive

#### Вулканы: критические условия для предполагаемых магматических систем.

Работа GLI-механизма в случае вулкана определяется растворенным в магме флюидом и его объемами, аккумулированными под сводами магматических очагов. Можно показать [4], что условие (1) преобразуется в условие для критического объема магмы  $V_m^{cr}$  в магматическом очаге:

$$V_m^{cr} = \gamma g S H^2 / (k_o - k_m) R T_m \quad (2)$$

где  $(k_o - k_m)$  - доля флюида, перешедшая в газообразную фазу при подъеме магмы на глубину  $H$  магматического очага,  $S$  - сечение канала,  $T_m$  - температура магмы,  $R$  - газовая постоянная флюида.

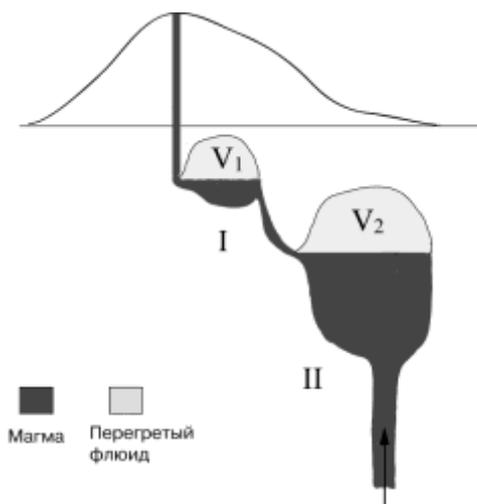


Рис.5 Магматическая система вулкана с двумя очагами и флюидными «шапками» объемом  $V_1$  и  $V_2$

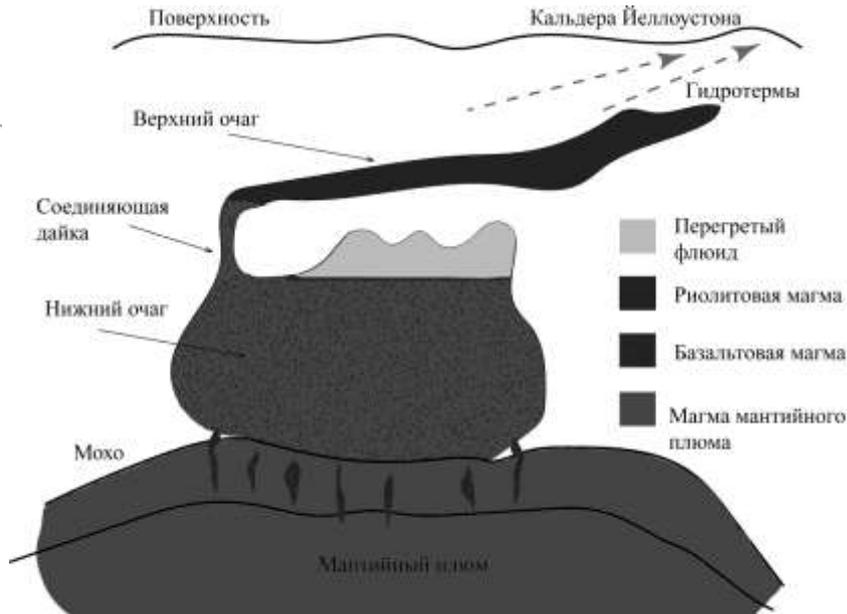


Рис.6 Предполагаемая магматическая система Йеллоустона: верхний очаг с риолитовой магмой соединен дайкой с нижним очагом, под сводом которого аккумулирован критический объем флюида.

Нетрудно видеть, что при наличии в системе двух магматических очагов (Рис.5) с объемами флюидов  $V_1$  и  $V_2$ , превышающими соответствующие критические объемы, возможно как формирование стратовулкана (работает верхний очаг, выбрасывая магму из канала), так и кальдерообразующие извержения (срабатывает нижний очаг, опустошая от магмы и канал, и верхний очаг). Если объем нижнего очага намного превышает и объем верхнего очага и критический объем (2), то может произойти извержение с опустошением верхнего очага и образованием кальдеры даже в отсутствие сформировавшегося стратовулкана, как это и могло быть в случае Йеллоустона (Рис.6). Накопление критического объема флюида под сводом нижнего очага могло происходить вследствие всплывания пузырьков флюида в вязкой магме – процесс, который при толщине очага в несколько км могв Йеллоустоне занимать сотни тысяч лет [6].

### **Список литературы**

1. *Parfitt E.A., Wilson L.* Fundamentals of Physical Volcanology. Blackwell Publishing, 2008. 256 p.
2. *Nechayev A.* About the mechanism of geyser eruption; 2012. Available: <http://arXiv: 1204.1560v1>
3. *Belousov A., Belousova M. and Nechayev A.*: Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for geyser mechanism, *Geology*, 2013, v.41, p.387-390.
4. *Nechayev A.*: On the origin of Mount Etna eruptive cycles and Stromboli volcano paroxysms: implications for an alternative mechanism of volcano eruptions. // URL <http://arxiv.org/> 2014, Arxiv:1405.7002.
5. *Nechayev A.* Magma, crust and fluid: Critical conditions of their interaction and types of volcanic eruptions. *Applied Physics Research*. 2015, v.7(6), p.75- 84.
6. *Nechayev A.* On the Mechanism of Catastrophic Caldera-forming Eruptions: Yellowstone's Approval. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2016, v.6(4), p.1-9.