

## Распределение вулканических извержений по масштабу с целью прогноза опасности и изучения возможных механизмов агрегации магмы в литосфере Земли

**В.В. Иванов**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: [victor@kscnet.ru](mailto:victor@kscnet.ru)*

Распределения объемов тефры ( $V_T$ ), изверженной вулканами мира и Камчатки за последние два столетия, подчиняются степенному фрактальному закону с показателем степени  $\gamma < 1$  ( $\gamma = 0,7-0,75$ ). Это приводит к парадоксальному, на первый взгляд, факту, что при увеличении масштаба извержений на порядок, несмотря на падение частоты встречаемости примерно в 5 раз, суммарные объемы выбрасываемой ими тефры, напротив, возрастают примерно в 2 раза. Даны прогнозы наиболее вероятных интервалов повторяемости и объемов выброшенной тефры для извержений разного масштаба на Камчатке. Высказана гипотеза, что степенное распределение ( $V_T$ ) может объясняться лавинообразным характером слияния и укрупнения всплывающих в литосфере трещин, заполненных магмой (даек) [9], которые питают извержения. Показано, что графики повторяемости распределений ( $V_T$ ) и сейсмического момента ( $M_0$ ) сильных землетрясений на Камчатке имеют близкие показатели степени  $\gamma = 0,7$  и  $0,6$ ; соответственно.

### Введение

Вид распределения извержений по масштабу обязан существованию определенных механизмов агрегации магмы в верхней мантии и литосфере Земли и может способствовать их изучению. Отсутствие надежных оценок распределений в прошлом было связано с малым объемом данных, обусловленным как недостаточно длительным периодом инструментальных наблюдений на Камчатке, так и большими трудностями в оценке масс изверженных продуктов, которая рассматривалась как основной параметр, характеризующий масштаб извержения. В работе [3] для Камчатки и мира проанализировано распределение *класса извержения*, представляющего собой десятичный логарифм массы (в кг) всех выброшенных во время извержения продуктов. Получена линейная в двойном логарифмическом масштабе зависимость между массой продуктов и частотами извержений с углом наклона графика, равным 0,66. Распределение величин *вулканического эксплозивного индекса (VEI)* для извержений всего мира проанализировано в работе [8]. Показано, что *VEI* в диапазоне от 2 до 7 распределены по экспоненциальному закону, однако для *VEI* = 8 отмечен огромный дефицит числа событий на два десятичных порядка по величине. Можно предположить, что извержения с *VEI* = 7 – это предельно возможные в настоящее время на Земле извержения, поскольку несколько извержений с *VEI* = 8 (кальдеры Йеллоустоун, Тоба и др.) произошли миллионы лет тому назад, вероятно, в период более высокой вулканической активности, чем нынешняя. В работе [8] не рассматривалось распределение самих объемов ( $V_T$ ), не ставились вопросы характера распределения, его природы и не давались прогнозные оценки.

### Исходные данные и методика обработки данных

В каталогах извержений по различным регионам мира [4] масштаб взрывной активности *исторических* извержений характеризуется величинами *вулканического эксплозивного индекса (VEI)*. *VEI* является *полуколичественной оценкой*, поскольку оценивается по совокупности косвенных количественных и качественных параметров, таких как: высота подъема вулканических облаков, продолжительность извержения, его характер и т.д. [6]. Для некоторых извержений оценки объемов выброшенной тефры ( $V_T$ ) удавалось сделать инструментальными или геологическими методами. Это дало авторам этой работы возможность для каждого *VEI* указать величины нижней и верхней границ ( $V_T$ ) (Table 8, [6]). Например, для умеренного извержения вулкана с *VEI* = 3, объем выброшенной тефры оценивается от 1 до 10 млн. м<sup>3</sup>, а для катастрофического извержения

с  $VEI = 5$  – от 1 до  $10 \text{ км}^3$ . Данные из [6, таблица 8] позволяют составить регрессионную зависимость *среднего объема* выброшенной во время извержения тefры ( $V_T$ ) от  $VEI$  следующим образом:

$$V_T (\text{км}^3) \approx 10^{(VEI - 4.3)} \quad (\text{для } VEI \geq 2) \quad (1)$$

Таким образом, по этой формуле мы можем приближенно оценивать объем изверженной тefры в  $\text{км}^3$ .

Нами строились распределения объемов ( $V_T$ ) для извержений мира и Камчатки с 1800 по 2016 гг. в двойном логарифмическом масштабе ( $LgN - VEI$ ), где  $N$  – число извержений с данным  $VEI$ , нормированное на 1000 лет. Для каждого  $VEI$  выбирались представительные интервалы времени, в пределах которых кумулятивные графики числа извержений линейно с одинаковой крутизной нарастали со временем. Например, для слабых извержений с  $VEI = 2$  брались выборки с 1950 по 2016 гг., для пароксизмальных и колоссальных извержений с  $VEI = 6$  и  $7$  – с 1800 по 2016 гг. и т.д. Стандартными статистическими методами оценивалась степень надежности степенной аппроксимации распределений ( $V_T$ ), тангенсы углов наклона графиков повторяемости ( $\gamma$ ) и их доверительные интервалы (Excel, 2010, пакет анализа данных /линейная регрессия).

### Анализ распределений $VEI$ и прогноз объемов выброшенной тefры для вулканов мира и Камчатки

Распределения  $VEI$  и соответствующего ему объема изверженной тefры ( $V_T$ ) для извержений мира и Камчатки с начала 19-го столетия по 2016 г. приведены на рисунке.

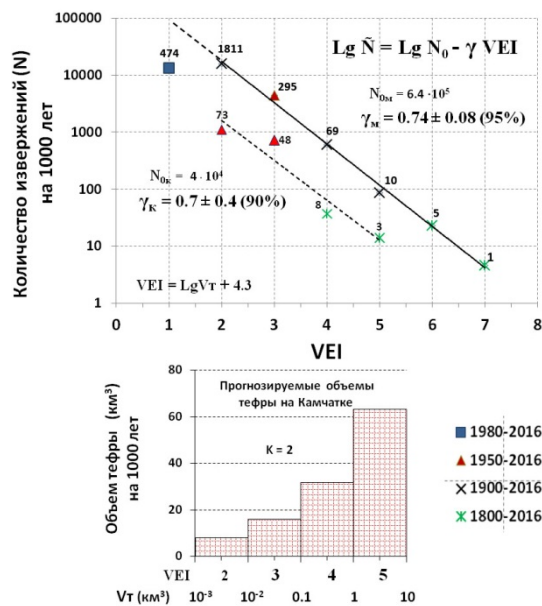


Рисунок. Верхние графики: распределения  $VEI$  и соответствующих ему объемов тefры ( $V_T$ ,  $\text{км}^3$ ), выброшенной при извержениях вулканов мира (сплошная линия) и Камчатки (пунктирная линия) в XIX – начале XXI столетий. Цифры над точками обозначают количества извержений в выборке для каждого  $VEI$ . Нижняя гистограмма: наиболее вероятные объемы тefры, которая будет выброшена всеми вулканами Камчатки в следующие 1000 лет.

общемировой, что достаточно много, поскольку длина вулканической дуги Камчатки всего около 2 % от суммы длин всех вулканических дуг на Земле. Вероятно, это соотношение будет справедливо и для  $VEI = 6 - 7$ .

Распределения  $VEI$  аппроксимируются линейной зависимостью вида

$$Lg \tilde{N} = Lg N_0 - \gamma VEI = Lg N_0 - \gamma (Lg V_T + 4.3) \quad (2)$$

Отсюда зависимость количества извержений  $\tilde{N}$  можно записать в виде следующей степенной функции от  $V_T$  с показателем степени ( $-\gamma$ )

$$\tilde{N} = (N_0 \cdot 10^{-4.3\gamma}) (V_T)^{-\gamma} \quad (3)$$

где  $\tilde{N}$  – прогнозируемое количество извержений, нормированное на 1000 лет,  $\gamma$  – тангенс наклона угла графика повторяемости ( $0 < \gamma < 1$ ),  $N_0$  – начальное значение, зависящее от уровня активности вулканической зоны,  $Lg$  – десятичный логарифм. Величины параметра  $R^2$ , характеризующего отклонение данных от степенной зависимости, были равны 0,99 и 0,92 для мира и Камчатки, соответственно. Сравнительно большие, близкие к 1 величины  $R^2$ , позволяют утверждать, что оба распределения хорошо описываются степенным законом.

Из данных рисунка и выражения (3) можно сделать следующие выводы:

1) Частота встречаемости извержений вулканов на Камчатке в диапазоне  $VEI$  от 2 до 5 составляет примерно 10% от

2) Распределения объемов выброшенной тефры ( $V_T$ ) для извержений вулканов мира и Камчатки подчиняются *фрактальному степенному закону распределения* с близкими тангенсами угла наклона графика повторяемости  $\gamma = 0.7 - 0.75$  (верхний рисунок). Данные по Камчатке имеют существенно больший разброс, чем общемировые.

3) Для извержений мира параметр  $\gamma$  с уровнем доверия 0.05 принадлежит интервалу (0.66; 0.82), т.е.  $\gamma < 1$ . С меньшей надежностью это верно и для извержений Камчатки. Поскольку графики повторяемости для ( $V_T$ ) в двойном логарифмическом масштабе сравнительно пологие ( $\gamma < 1$ ), то доля сильных событий здесь значительно больше, чем в случае ( $\gamma > 1$ ). Это означает, что вулканические извержения, как и сильные землетрясения, относятся к *катастрофам* (более подробное объяснение дано ниже).

4) Степенное распределение масштаба извержения характерно и для отдельных вулканов, например для длительности активных фаз Ключевского вулкана (изолированных эпизодов вулканического дрожания), продолжительностью от нескольких часов до нескольких месяцев [2, рис. 5]. Общее число эпизодов  $N = 131$ : из них шесть наиболее длительных, включающих вершинные извержения. Аналогичное степенное распределение продолжительности активизаций имеет место на активном Карымском вулкане. Следовательно, можно полагать, что степенное распределение масштаба всех извержений в некоторой вулканической зоне есть суперпозиция степенных распределений масштабов извержений отдельных вулканов, составляющих эту зону.

5) Прогнозируемые средние интервалы между извержениями на Камчатке и объемы выброшенной тефры оцениваются следующим образом: катастрофические извержения с  $VEI = 5$  ( $V_T = 1 - 10 \text{ км}^3$ ), наподобие вулкана Ксудач в 1907 г. или Безымянного в 1956 г., будут происходить в среднем примерно 1 раз в 80 лет и за тысячу лет выбросят около  $60 \text{ км}^3$  тефры (или  $60 \text{ млн м}^3$  в год). Если экстраполировать график повторяемости в сторону больших  $VEI$ , то пароксизмальные извержения на Камчатке с  $VEI = 6$  ( $V_T = 10 - 100 \text{ км}^3$ ), наподобие извержения Кракатау в 1883 г., следует ожидать с интервалом одно извержение примерно в 500 лет и за тысячу лет выбросят около  $120 \text{ км}^3$  тефры. А колоссальные извержения с  $VEI = 7$ , наподобие извержения Тамборы в 1815 г. ожидаются с интервалом примерно в 1500 лет и выбросят за одну тысячу лет примерно  $240 \text{ км}^3$  тефры. Оценки получены для значения параметра  $\gamma = 0.7$ .

Заметим, что с увеличением  $VEI$  происходит значительное снижение частоты извержений (рисунок, верхние графики). Тем не менее, все извержения с  $VEI = k+1$  выносят примерно в два раза больше тефры, чем все извержения с  $VEI = k$  (расчеты проведены для  $\gamma = 0,7$ ). Это следствие того, что  $\gamma < 1$ . Например, извержения вулканов Камчатки с объемами тефры ( $V_T$ ) от 1 до  $10 \text{ км}^3$  встречаются примерно в пять раз реже, чем извержения с  $V_T$  от 0.1 до  $1 \text{ км}^3$ , однако вклад первых будет примерно в два раза больше, чем от более слабых извержений (рисунок, нижняя гистограмма). Следует подчеркнуть, что это оценки наиболее вероятных интервалов повторения и объемов тефры, реальные величины будут иметь значительный случайный разброс. Заметим, что эти расчеты верны при условии сохранения устойчивости продуктивности многоактных вулканов или других вулканических образований. Согласно работе [10] она в первом приближении сохраняется на временных интервалах в сотни и первые тысячи лет.

### **О возможном объяснении степенного распределения масштаба вулканических извержений**

Длительность активизаций или объем изверженной тефры на некотором вулкане подчиняются степенному закону с отрицательным показателем степени ( $-\gamma$ ), по модулю меньшим 1. Если полагать, что каждое извержение или активизация связаны с поступлением к дну центрального кратера вулкана порции свежей магмы, то указанное распределение можно в первом приближении трактовать как распределение объемов этих порций. Вероятно, отсюда следует, что распределение масс порций магмы, периодически

поднимающихся к центральному кратеру вулкана во время извержений или подпитывающих его магматический очаг, также имеет степенной характер с  $\gamma < 1$ .

Как известно, явления или объекты со степенными законами распределения относятся к распределениям с т.н. «тяжелыми хвостами», для которых, в частности, математическое ожидание и дисперсия  $= +\infty$ , что физически невозможно, так как означает бесконечную энергию таких процессов. Это парадоксально и может объясняться только тем, что случайные величины с такими распределениями не бесконечны; для них должны существовать некоторые предельные значения. Механизмы образования явлений или объектов с такими распределениями оживленно дискутируются [7]. Медленный спад частоты сильных событий в степенных распределениях по сравнению с другими распределениями в некоторых работах пытаются объяснить *лавинообразными процессами*.

В качестве одного из претендентов рассмотрим механизм агрегации магмы путем слияния мелких плавучих трещин, заполненных магмой и поднимающихся в литосфере Земли в более крупные, который исследовался экспериментально в работе [9]. Можно высказать предположение, что в результате слияния закон их распределения по размерам меняется с экспоненциального или нормального на степенной. Лавинообразность процесса, по нашему мнению, возникает вследствие того, что скорость подъема плавучей трещины зависит от ее высоты в очень сильной (четвертой) степени [9, формула (19)].

Отметим, что график повторяемости моментной магнитуды ( $M_w$ ) для землетрясений Камчатки с  $M_w = 6 - 8$  имеет тангенс угла наклона  $\gamma \approx 0,9$  [1, рис. 2]. С учетом пересчета ( $M_w$ ) в десятичный логарифм сейсмического момента ( $M_0$ ) по формуле из работы [5]

$$\text{Lg}M_0 \approx (3/2) M_w + 9,1, \quad (4)$$

получается, что  $M_0$  также распределен по степенному закону с показателем степени  $\gamma \approx -0,6$ . Это весьма близко к величине  $\gamma$  для распределения объема вулканической тефры ( $V_T$ ), равного примерно  $-0,7$ . Полагают, что сильные землетрясения и вулканизм порождаются единым процессом-субдукцией тихоокеанской литосферы под континентальную камчатскую литосферу. Означает ли это, что объем генерации магмы зависит от размера подвижки при сильном межплитовом землетрясении или это случайное совпадение?

Автор выражает сердечную благодарность В.А. Широкову за научное редактирование статьи.

### Список литературы

1. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли, 2004. № 2. С.1-9.
2. Иванов В.В. Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. кандидата геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с.
3. Токарев П.И. Количественная характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 110-118.
4. Global Volcanism Program ([http://volcano.si.edu/search\\_eruption\\_results.cfm](http://volcano.si.edu/search_eruption_results.cfm)).
5. Hanks T. C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophys. Res., 1979. Vol. 84, Issue 5, 2348 - 2350, 9B0059.
6. Newhall C.A., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // Journal of Geophys. Res. 1982. V. 87. Issue C2. P. 1231—1238.
7. Newman M. E. J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law // Contemporary Physics, September–October 2005. Vol. 46, No. 5, PP. 323 – 351.
8. Simkin T., Siebert L. Earth's Volcanoes and Eruptions: An Overview // Encyclopedia of volcanoes. Ed. in chief H. Sigurdsson. San Diego, Academic press. 1999. PP. 249-262.
9. Takada A. Accumulation of magma in space and time by crack interaction // Magmatic systems. Ed. M. P. Ryan. Academic press. 1994. P. 241-257.
10. Wadge G. Steady state volcanism: Evidence from eruption histories of polygenetic volcanoes // Journal of Geophys. Res. 1982. May 10. V. 87. № B3. PP. 4035-4049.